

Optimasi Struktur Tubercle Pada Desain Airfoil Baling Kipas Untuk Meningkatkan Lift-To-Drag Ratio Menggunakan Metode Taguchi Dan Computational Fluid Dynamics (Cfd)

1st Pangestu Rizky Purnama
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

pangstur@student.telkomuniversity.a
c.id

2nd Rino Andias Anugraha
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

rinoandias@telkomuniversity.ac.id

3rd Teddy Sjafrizal
Universitas Telkom
Fakultas Rekayasa Industri
Bandung, Indonesia

teddysjafrizal@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Perancangan desain baling kipas dimodelkan melalui geometri *airfoil*. Geometri ini memberikan keuntungan hasil aliran yang dinilai melalui parameter performa berupa *lift-to-drag ratio* (*LtD*). *LtD* memiliki efek simetris terhadap peningkatan torsi, dimana torsi akan direpresentasikan melalui baling-baling kemudian menghasilkan aliran udara. Dengan peningkatan parameter performa *airfoil* (*LtD*) diharap dapat memberikan peningkatan pada hasil aliran kipas. Dalam pengembangan parameter desain, didapatkan sebuah struktur dari inspirasi sirip paus bungkuk berupa struktur *tubercle* yang dibentuk melalui model gelombang sinus. Struktur memiliki faktor utama berupa panjang gelombang dan amplitudo. Struktur ini secara luas diterapkan untuk memberikan peningkatan terkait kinerja *airfoil*. Hal ini didasarkan pada kemampuan struktur melalui sifat *lift* yang tinggi dan *drag* yang rendah. Sehingga dalam studi ini struktur digunakan untuk mengoptimalkan model desain *airfoil* pada bilah kipas sehingga dapat memberikan peningkatan performa yang lebih baik. Model kipas dibentuk melalui *computer aided design* (CAD) dengan penerapan basis data *airfoil* dari *national advisory committee for aeronautics* (NACA) untuk mempermudah proses desain. Struktur *tubercle* ditelusuri lebih lanjut melalui Metode Taguchi dengan dilakukan simulasi melalui *computational fluid dynamics* (CFD), dengan desain terpilih dilakukan proses validasi. Didapatkan peningkatan 9% pada *lift* dan penurunan drag sebesar 36% atau peningkatan pada *lift-to-drag ratio*, dan peningkatan aliran sebesar 8.5%.

Kata kunci: Struktur *Tubercle*, *airfoil*, *lift-to-drag ratio*, kipas, Metode Taguchi, *computational fluid dynamics*.

Abstract

The design of the fan blades is modeled through the geometry of the *airfoil*. This geometry provides an advantage in the flow that is assessed through performance parameters in the form of *lift-to-drag ratio* (*LtD*). *LtD* has a symmetrical effect on increasing torque, where torque will be represented through the propeller and then produces airflow. With the increase in *airfoil* performance parameters (*LtD*) it is hoped that it will provide an increase in fan flow results. In developing the design parameters, a structure was obtained from the inspiration of the humpback whale fin in the form of a *tubercle* structure formed through a sine wave model. The structure has the main factors in the form of wavelength and amplitude. This structure is widely applied to provide improvements in *airfoil* performance. This is based on the ability of the structure through its high *lift* and low *drag* properties. In this study the structure is used to optimize the *airfoil* design model on the fan blades so that they can provide better performance improvements. The fan model is formed through *computer aided design* (CAD) with the application of the *airfoil* database from the *national advisory committee for aeronautics* (NACA) to simplify the design process. The *tubercle* structure was explored further through the Taguchi method by performing simulations through *computational fluid dynamics* (CFD), with the selected design being validated. There is a 9% increase in *lift* and a 36% decrease in *drag* or a 69% increase in *lift-to-drag ratio*, and an 8.5% increase in flow.

Keywords: *Tubercle* structure, *airfoil*, *lift-to-drag ratio*, fan, Taguchi method, *computational fluid dynamics*

I. PENDAHULUAN

a. Latar Belakang

Kipas merupakan peralatan yang digunakan dengan memanfaatkan aliran udara dari pergerakan motor dan bilah¹. Kipas diterapkan melalui berbagai metode antara lain, *heat transfer* sebagai fungsi pendingin pada komponen elektronik, sirkulasi udara pada kipas angin atau *exhaust* ruangan dan kipas pembuangan pada *blower* asap. Performa kipas secara umum dipengaruhi langsung oleh kesesuaian desain bilah pada baling-baling dan motor penggerak. Peningkatan spesifikasi motor tanpa disertai

penyesuaian desain kipas memiliki kecenderungan terhadap peningkatan penggunaan energi atau hilangnya kemampuan dorong udara yang diakibatkan kecepatan putar tidak sesuai. Pengembangan desain melalui manipulasi parameter desain baling baling kipas berhasil memberikan peningkatan kualitas aliran. Parameter seperti jumlah bilah, diameter *hub*, diameter bilah, tinggi *hub*, tinggi bilah dan geometri *airfoil* berpengaruh langsung terhadap hasil aliran udara. Pemilihan jumlah bilah akan berpengaruh terhadap tingkat kebisingan kipas dan kecepatan aliran secara menyeluruh, jumlah bilah yang lebih banyak memberikan kebisingan lebih rendah namun

disertai penurunan hasil aliran, hal ini juga berlaku pada bilah yang lebih sedikit dengan kebisingan tinggi namun menghasilkan aliran udara lebih besar². Proses pengembangan desain untuk meningkatkan aliran dilakukan dengan rekayasa geometri *airfoil*. Basis geometri NACA sebagai sarana pembentukan desain 3D dengan jelas memberikan kemudahan dalam pengembangan anatomi airfoil dan peningkatan hasil aliran^{3,4}. Selain itu studi terdahulu⁵ mengemukakan bahwa peningkatan gaya angkat (*lift*) memiliki perilaku simetris terhadap peningkatan konversi torsi, hal ini mengindikasikan bahwa perubahan diantara memicu perubahan selaras. Di sisi lain, *airfoil* NACA memiliki karakteristik kecocokan objek terapan yang berbeda, sehingga pemilihan seri geometri akan sangat mempengaruhi hasil penerapan⁴ Hasil studi menunjukkan bahwa rekayasa geometri *airfoil* pada desain bilah mampu meningkatkan performa. Peningkatan hasil aliran udara kipas oleh studi terkait^{4,5} terhadap perilaku simetris antara *lift* terhadap torsi menunjukkan keterkaitan antara peningkatan *lift* dan torsi terhadap peningkatan aliran udara. Dengan demikian pengembangan desain bilah melalui rekayasa geometri *airfoil* dan penerapan geometri *airfoil* NACA dapat dijadikan alternatif dalam peningkatan performa kipas. Studi pada *airfoil* NACA-0018⁶ mendapatkan parameter optimal dengan 2.5% *chord* untuk amplitudo dan 1/6 *chord* pada panjang gelombang. Di sisi lain, studi sejenis⁷ melalui pengembangan desain bilah kipas *axial* dan geometri *airfoil* NACA-4415 menemukan nilai optimum parameter penyusun 3% *chord* amplitudo dan 5% *chord* untuk panjang gelombang. Selain tren keuntungan peningkatan *lift* dan penurunan *drag*, nilai faktor optimal parameter pembentuk struktur memiliki tren yang berbeda pada setiap geometri airfoil dan objek terapan, sehingga optimasi nilai faktor diperlukan terhadap geometri *airfoil* yang akan digunakan.

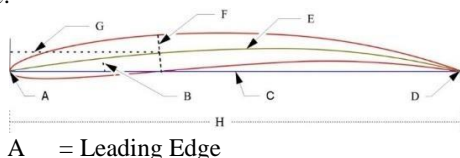
b. Tujuan

Penelitian ini dilakukan untuk menghasilkan peningkatan performa pada geometri *airfoil* dengan diterapkan pada desain kipas. Selain juga ditujukan untuk mendapatkan parameter dan desain optimal dari penerapan struktur *tubercle* pada geometri *airfoil* yang dirapkan pada desain baling kipas.

II. KAJIAN TEORI

a. Geometri Airfoil

Airfoil merupakan geometri 2D yang memberikan keuntungan pemisahan aliran dalam interaksi fluida⁸. Geometri *airfoil* secara umum banyak diterapkan sebagai dasar model 3D dalam kajian interaksi aliran fluida. Beberapa penerapan yang mudah dijumpai antara lain sayap pesawat, *propeler* pompa, turbin, hingga penerapan sederhana seperti pada baling baling kipas. Salah satu penelitian yang dilakukan pada desain baling baling kipas oleh¹, mengidentifikasi penerapan *airfoil* sebagai parameter desain bilah pada baling baling kipas memberikan pengaruh pada torsi dan hasil aliran udara. Gambar 1 merupakan parameter penyusun geometri yang digunakan dalam mendefinisikan bentuk umum dan perbedaan ketebalan pada permukaan atas dan bawah *airfoil*.



- B = Location of Maximum Chamber
- C = Chord Line
- D = Trailing Edge
- E = Mean Chamber Line
- F = Maximum Thickness
- G = Location of Maximum Thickness
- H = Chord

Gambar 1 Geometri airfoil

b. Struktur *Tubercle*

Biomimicry atau *bionic design*, merupakan konsep pengembangan produk yang dilakukan melalui implementasi keadaan alam terhadap objek terapan. Penerapan konsep *biomimicry* berfokus pada meniru karakteristik fungsi atau sistem kerja organisme alam^{9,10}. Salah satu penerapan *biomimicry* pada awal perkembangan dijumpai pada imitasi Sirip Paus Bungkuk melalui kajian peningkatan performa hidrodinamis melalui penurunan gaya hambat (*lower drag*). Selain penurunan gaya hambat, hasil imitasi juga memberikan peningkatan pada gaya angkat dan kestabilan pada hasil aliran. Rekayasa desain yang di inspirasikan dari alam berupa penerapan Struktur *Tubercle Leading Edge* (TLE) pada Sirip Paus Bungkuk dikembangkan¹¹. Studi awal diinspirasi dari proporsi sirip dengan tubuh Paus Bungkuk yang sangat kecil namun dapat mendukungnya dalam melakukan manuver tinggi. Pada lanjutan studi sejenis pada penerapan struktur dimodelkan menjadi dua jenis berupa bola dan gelombang. Kecenderungan peningkatan gaya hambat didapat pada bentuk bola sehingga performa bentuk gelombang memiliki keuntungan aerodinamis lebih baik. Salah satu pengembangan studi penerapan struktur terdapat pada turbin yang dikembangkan oleh¹², dengan geometri airfoil dasar berupa NACA 634-021 didapatkan penurunan gaya hambat yang mengakibatkan bilah turbin lebih sensitif terhadap kecepatan angin, sehingga memberikan peningkatan kemampuan untuk berputar pada kecepatan angin rendah. *Airfoil* sebagai bagian utama pembentuk objek pada sistem pemisahan aliran dalam kajian aerodinamis dikembangkan dengan penerapan struktur. Penerapan basis geometri *airfoil* digunakan sebagai variable utama dalam proses penentu parameter pembentuk struktur. Studi⁶, menerapkan parameter struktur yang didapatkan dari persen panjang *chord* pada *airfoil*. Tabel 1 merupakan parameter struktur berupa persen *chord airfoil*.

Tabel 1 Parameter Struktur

Level	Amplitudo (c_b)	Panjang Gelombang (λ)
0	0	0
1	1.5%	(1/6)
2	2.5%	(1/3)
3	3.5%	(1/2)

Tabel 1 merupakan parameter pembentuk struktur yang diterapkan pada *vertical axis wind turbines* atau turbin vertikal dengan dasar desain bilah menggunakan geometri airfoil NACA 0018. Parameter ini kemudian diserap dalam tahap lanjutan pengembangan struktur pada penampang bilah kipas dengan desain bilah dasar menggunakan NACA 5608. Selain dari kesamaan metode dan model sistem (Metode Taguchi dan CFD) yang sama, geometri airfoil dasar pengembangan bilah pada baling baling kipas juga memiliki seri naca yang sama berupa NACA seri 4.

c. Metode Taguchi

Design of Experiment (DoE) digunakan untuk mengetahui penyebab proses variasi hasil sebagai akibat dari variasi *input* proses. DoE berguna memperlihatkan

efek dari variabel yang tersembunyi, sehingga memunculkan efek dari perbedaan variabel input dari proses pengembangan desain. Penyelesaian studi menggunakan DoE sebagai media pemodelan eksperimen bertujuan untuk memberikan analisis menyeluruh terhadap faktor yang diberikan dengan sumber daya minimum. Dalam studi ini Metode Taguchi sebagai salah satu DoE yang digunakan dalam analisis multi-faktor dipilih untuk menentukan dasar desain eksperimen terkait desain produk dan tahapan penyelesaian penelitian hingga didapat desain optimal.

Metode taguchi merupakan sebuah *tool* yang biasa digunakan dalam membentuk DoE. Metode ini, kerap dipilih karena menawarkan pemodelan desain eksperimen dan metode analisis terhadap keluaran yang didapatkan sehingga sangat praktis dan efektif terhadap sumber daya penelitian⁶. Keuntungan utama metode ini merupakan pengembangan desain terkait variasi termasuk identifikasi faktor yang digunakan untuk mendapatkan peningkatan performa. Eksperimen didasarkan pada *Orthogonal Array* (OA) yang dikembangkan dari jumlah hasil kombinasi antar level pada faktor yang ada. Di sisi lain, analisis hasil dilakukan melalui hasil perhitungan *signal-to-noise ratio* (s.n r).

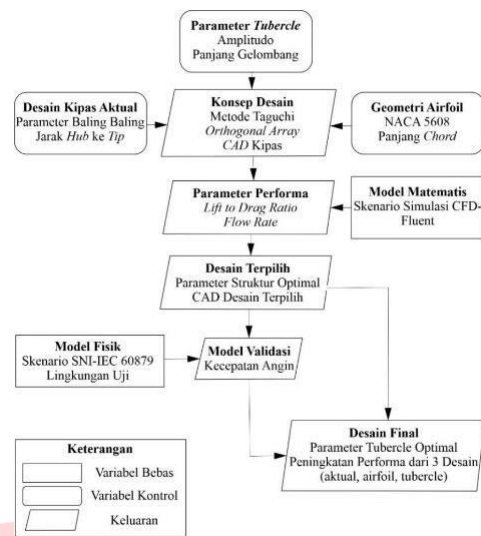
d. Computational Fluid Dynamics (CFD)

ANSYS Fluent merupakan salah satu model sistem analisis CFD yang dapat digunakan dalam pemodelan CAD kedalam fungsi fisik sebagai masukan dalam penyelesaian masalah melalui model matematis. ANSYS Fluent memiliki kemampuan tinggi terkait hasil analisis pemetaan sistem aliran, turbulensi, hingga perpindahan panas dalam upaya pengoptimalan dan pengembangan produk. Fluent memiliki integrasi yang lebih baik dari CFX terkait integrasi dua arah dari model dan pemrosesan analisis terhadap lingkungan.

III. METODE

a. Metodologi Penelitian

Penerapan *bionic design* struktur *tubercle leading edge (TLE)* ditujukan untuk mendapatkan memberikan peningkatan performa airfoil airfoil. Efek peningkatan gaya angkat (*lift*) dan penurunan gaya hambat (*drag*) terhadap peningkatan debit aliran menjadi kajian utama penerapan struktur. Model konseptual *dibuat* untuk memudahkan pemahaman konsep permasalahan dan penyelesaian studi. Disamping itu batas dan cakupan studi juga dijabarkan secara ringkas. Gambar 2 dibawah merupakan model konseptual pada studi ini.



Gambar 2 Model konseptual studi

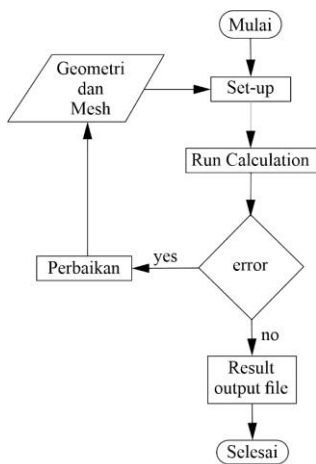
Gambar. 1 menunjukkan model konseptual desain yang didapatkan dari beberapa masukan utama berupa desain kipas aktual, geometri *airfoil*, dan parameter *tubercle*. Konsep desain dikembangkan pertama melalui *re-design* pada baling kipas dari produk eksisting dengan diterapkan geometri *airfoil* sehingga didapatkan pembaruan desain. Desain kipas aktual baru yang kemudian disebut kipas AA selanjutnya diterapkan struktur *tubercle* sesuai dengan *design of experiment* yang terbentuk dari Metode Taguchi terkait hubungan antara parameteranya. Selanjutnya dilakukan dengan model sistem matematis menggunakan CFD Fluent untuk mendapatkan parameter performa bilah berupa *lift to drag ratio*. Parameter perform ini kemudian digunakan sebagai bahan analisa terhadap pemilihan desain optimal atau konsep desain terpilih. Parameter performa yang dipilih adalah keluaran dengan nilai *s.n ratio* terbesar atau dengan kriteria nilai *larger is better*. Selain desain terpilih, dalam tahap ini juga didapatkan keterkaitan faktor yang lebih signifikan dan level faktor mana yang berhasil memberikan peningkatan *lift-to-drag ratio* optimal.

Dengan konsep desain terpilih kemudian dilakukan eksperimen melalui model fisik hasil serapan skenario uji pengukuran performa kipas rumah tangga dari SNI IEC 60879.2013. Keluaran eksperimen uji berupa kecepatan aliran angin terdiri dari tiga buah data yang dihasilkan dari tiga buah desain baling-baling kipas yang antara lain adalah baling baling produk eksisting, model baling-baling dengan penerapan geometri *airfoil*, dan konsep desain terpilih atau balingbaling dengan penerapan geometri *airfoil* dan struktur *tubercle* optimal.

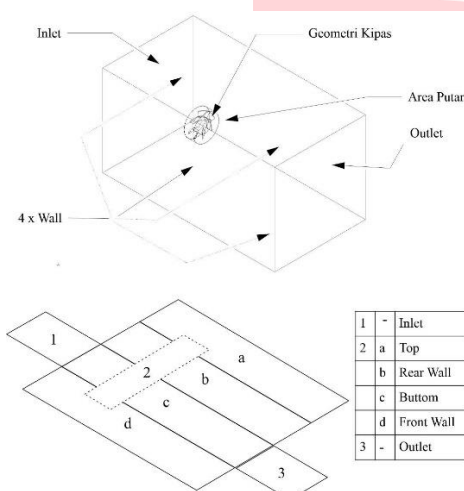
b. Prosedur

A. Simulasi CFD

Proses simulasi perputaran kipas dilakukan menggunakan CFD Fluent. Geometri baling-baling kipas akan didefinisikan sebagai *mesh motion* dengan pembatas ruang berupa geometri area putar. *Lift* dan *drag* ditentukan sebagai *report definitions*. Setelah proses *set-up* selesai, simulasi dijalankan, ketika terjadi *error* maka dilakukan perbaikan kemudian dilakukan pengulangan simulasi sehingga perbaikan tercapai dan parameter keluaran didapatkan. Gambar 3 merupakan flowchart proses simulasi, sedangkan gambar 4 merupakan model ruang pengujian yang dibentuk



Gambar 3 Flow chart simulasi CFD



Gambar 4 Ruang Pengujian Simulasi dan Validasi

Geometry dan Boundary conditions dirancang sesuai dengan sistem dan kondisi kerja kipas exhaust, selain itu juga dilakukan adaptasi terhadap prosedur pengujian penggunaan kipas pada lingkungan rumah tangga dari SNI IEC 60879.2013. Beberapa kondisi dan pengaturan yang dilakukan terhadap model simulasi antara lain sebagai berikut. Model *geometry* dibangun dari tiga bagian berupa Ruang Uji, Area Putar, dan Desain baling-baling kipas. Ruang uji dan area putar dimodelkan melalui pembentukan *enclosure*. Pengambilan data dilakukan melalui simulasi perputaran bilah kipas pada ruang tertutup menggunakan CFD Fluent pada ANSYS 2021 R1. Simulasi perputaran baling-baling kipas dilakukan pada kecepatan 1900 rpm, selain itu kondisi lingkungan pada ruang uji dan rotational area dianggap konstan. Data *output lift* dan *drag* dipilih untuk mengetahui pengaruhnya terhadap hasil kecepatan aliran angin

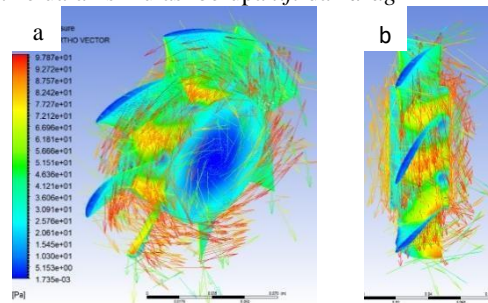
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Hasil

A. Hasil Simulasi

Keluaran data didefinisikan melalui *report definitions* dengan target berupa *surface fan blade* atau permukaan bilah kipas pada arah sumbu x untuk *lift* dan y untuk *drag*. Data secara otomatis didapatkan dari hasil pemetaan gaya permukaan bilah. Ilustrasi dibawah merupakan hasil representasi tekanan pada penampang bilah dengan arah tampilan *inlet* (a), *outlet* (b) dan *front wall* (c). Gambar 5 merupakan hasil pemetaan tekanan pada permukaan bilah kipas yang kemudian diberikan ilustrasi vektor arah aliran.

Drag dihasilkan dari nilai *absolute* resultan gaya dengan arah sumbu y, sedangkan *lift* didapatkan dari resultan gaya dengan arah sumbu x pada bilah kipas. Tabel 3 merupakan data keluaran simulasi berupa *lift* dan *drag*



Gambar 5 Representasi tekanan dan *streamline* kipas hasil simulasi dengan desain A1.

(tampilan *isometric* (a) dan tampilan dari sumbu z positif atau *front-wall* (b))

Tabel 2 Keluaran simulasi *lift* dan *drag*

Desain	Data Simulasi		
	<i>Lift</i>	<i>Drag</i>	<i>Lift-to- Drag Ratio</i>
AA ~ AA4	1.15E-02	1.82E-03	6.298E+00
A1	8.02E-03	1.63E-03	4.918E+00
A2	1.16E-02	1.61E-03	7.216E+00
A3	1.16E-02	1.21E-03	9.632E+00
AA5	1.15E-02	1.82E-03	6.298E+00
B1	1.22E-02	2.28E-03	5.341E+00
B2	1.22E-02	1.64E-03	7.440E+00
B3	1.25E-02	1.54E-03	8.103E+00
AA6	1.15E-02	1.82E-03	6.298E+00
C1	1.18E-02	2.05E-03	5.775E+00
C2	1.25E-02	1.35E-03	9.303E+00
C3	1.25E-02	1.17E-03	1.067E+01

Data *lift* dan *drag* dikonversi menjadi *lift to drag ratio* untuk selanjutnya dilakukan pengolahan data melalui perhitungan *s/n ratio* Merode Taguchi. Pengolahan dilakukan dengan kategori *larger is better* untuk mendefinisikan keluaran terbesar adalah keluaran yang diinginkan atau optimal. Berikut merupakan hasil konversi dan nilai *s/n ratio* yang didapatkan.

B. Hasil Validasi

Hasil rangkaian proses sebelumnya telah menunjukkan bahwa desain optimal didapatkan pada amplitudo dan panjang gelombang level 3 dengan desain C3 atau eksperimen ke-9. Lanjutan terkait hasil yang didapatkan proses lanjutan adalah pencetaan *prototype* desain terpilih untuk kemudian digunakan dalam pengukuran kecepatan angin kipas. Proses validasi dilakukan terhadap 3 desain antara lain desain produk eksisting, desain dengan geometri *airfoil* (AA), dan desain hasil optimasi dari struktur *tubercle* (C3). Gambar 6 merupakan ilustrasi pengukuran kecepatan kipas dengan mekanisme dari SNI IEC 60879.2013.



Gambar 6 Pengukuran kecepatan udara desain kipas terpilih.

Gambar 6 merupakan tampillah pada saat pengukuran kecepatan aliran udara dengan anemometer dengan kondisi lingkungan uji dianggap konstan. Pengujian dilakukan pada ruangan tertutup dan kipas yang telah dilakukan pengkondisian terlebih dahulu dengan dihidupkan selama 2 jam terlebih dahulu sebelum pengambilan data dilakukan. Tabel 3 merupakan data hasil pengukuran.

Tabel 3 Data validasi pengukuran kecepatan angin kipas

Waktu (s)	Data Aliran Angin (m/s) Jarak 120 cm		
	Kipas Eksisting	Kipas AA	Kipas C3
1	1.6	1.5	1.6
2	1.5	1.5	1.5
3	1.4	1.4	1.6
.....			
20	1.5	1.4	1.5
Rata-rata	1.44	1.47	1.53


Dari tabel 3 menunjukkan data aliran angin dari baling-baling kipas bawaan atau produk eksisting memiliki kecepatan rata-rata sebesar 1.44 m/s. Kemudian pada kipas dengan baling-baling yang diterapkan geometri *airfoil* 5608 didapat kecepatan rata-rata sebesar 1.48 m/s dan ditunjukkan terjadi peningkatan. Pada pengujian konsep desain terpilih didapatkan kecepatan aliran sebesar 1.53 m/s.

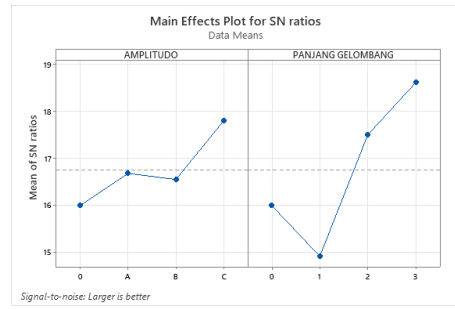
b. Analisis

A. Analisis Metode Taguchi

Perhitungan rata rata *s/n ratio* per eksperimen hasil optimasi digunakan dalam menentukan faktor dan level parameter mana yang paling optimal. Hasil perhitungan ditampilkan dalam grafik pada gambar 7 di bawah ini.

Tabel 4 Desain optimal (C3) struktur *tubercle* dan perbandingan desain AA

Faktor Parameter	Level	Nilai Level		Model Desain
		c_b	mm	
Amplitudo	3	3.5%	2,1	
Panjang Gelombang	3	1/6	10	
Desain Kipas C2 (A)		Desain Kipas AA (B)		

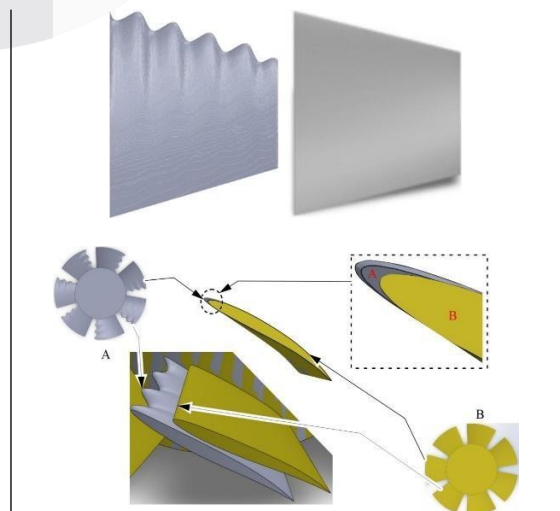


Gambar 7 Rata rata *s/n ratio* per eksperimen hasil optimasi

Gambar grafik di atas memperlihatkan bahwa panjang gelombang pada level 3 atau sebesar 10 mm memiliki nilai *s/n ratio* lebih tinggi dari level lainnya. Sedangkan pada faktor amplitudo, level C dengan nilai 2,1 mm memiliki nilai *s/n ratio* yang tertinggi. Selain dari nilai tertinggi, gambar 7 menunjukkan bahwa penerapan struktur memberikan kenaikan yang cukup besar terhadap desain awal yang ditunjukkan dari nilai *s/n ratio* level 0. Faktor amplitudo memiliki perubahan yang lebih kecil dari setiap perbedaan nilai level yang diterapkan, selain itu pada level B hasil keluaran memiliki kecenderungan lebih kecil atau turun dari nilai level sebelumnya (A) namun secara keseluruhan masih diatas nilai level 0 atau desain awal. Di sisi lain, pada faktor panjang gelombang, terdapat penurunan yang cukup besar pada awal penerapan struktur (level 0 ke level 1). Namun ketikan nilai level semakin dikecilkan kembali, performa *s/n ratio* mulai naik dan bahkan terjadi peningkatan yang signifikan dan membentuk sebuah tren. Tren yang didapatkan berupa semakin kecil panjang gelombang maka semakin baik performa yang diperoleh, hal ini sesuai dengan hasil studi sebelumnya.

B. Analisis Desain Terpilih

Perhitungan rata-rata *s/n ratio* per eksperimen menunjukkan hasil desain terpilih, sedangkan *s/n ratio* per level hasil optimasi menunjukkan informasi terkait faktor mana yang memiliki efek lebih signifikan terkait peningkatan performa dari parameter struktur. Hasil optimal dengan peningkatan *lift* dan penurunan *drag* didapatkan pada eksperimen ke-9 dengan parameter seperti pada gambar 7 dengan level panjang gelombang 3 dan amplitudo C. Selain itu juga dilakukan perbandingan terhadap model desain dan hasil kenaikan *lift-to-drag-ratio* pada desain awal (AA) dan desain terpilih. Secara berurutan tabel 4 dan Tabel 5 merupakan perbandingan desain dan hasil perolehan *lift*, *drag* dan *lift-to-drag ratio*.



Parameter optimal dengan faktor panjang gelombang dan amplitudo didapatkan pada level terkait dengan nilai 3,5% c_b atau sebesar 2,1 mm untuk amplitudo dan 1/6 c_b atau sebesar 10 mm untuk panjang gelombang. Hasil ini serupa dengan tren yang paparkan oleh⁷ dalam studi terhadap struktur pada bilah kipas. Di sisi lain, hasil studi dengan objek kajian berbeda dilakukan⁶ juga mendapatkan hasil serupa terkait persen parameter struktur *tubercle* dengan NACA seri 4. Kedua studi mengungkapkan bahwa semakin banyak jumlah gelombang yang terbentuk pada penerapan struktur *tubercle* secara langsung dipengaruhi panjang gelombang akan memberikan peningkatan keuntungan aerodinamis yang lebih baik. Di sisi lain, amplitudo yang memiliki nilai terbesar sebagai faktor lain struktur juga memberikan peningkatan paling tinggi. Kondisi ini sesuai dengan hasil akhir yang didapatkan berupa desain pada eksperimen 9 atau desain C3 terpilih sebagai desain optimal.

Tabel 5 Perbandingan *lift* dan *drag* hasil simulasi desain AA dan C3

Desain	Lift	Drag	Lift-to-Drag Ratio
AA	1.15E-02	1.82E-03	6.30E+00
C3	1.25E-02	1.17E-03	1.07E+01
Selisih	1.00E-03	-6.50E-04	4.37E+00
Peningkatan	9%	-36%	69%

Tabel 5 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan sebesar 9% pada *lift*, dan penurunan *drag* yang cukup besar hingga 36% atau dengan nilai *lift-to-drag ratio* hingga 69%. Di sisi lain, peningkatan performa *lift* dari sisi hasil desain diasumsikan sebagai akibat perbedaan panjang *chord* geometri *airfoil* sebagai efek penerapan struktur *tubercle* dari perbedaan desain ini kemudian dinilai bahwa aliran lebih merata sehingga tekanan lebih stabil. Setelah didapatkan data pengamatan dari proses validasi, perbandingan dilakukan terhadap rata-rata data hasil simulasi dan validasi. Data kipas eksisting diwakili oleh data model kipas dengan *airfoil* NACA. Sedangkan data kipas optimal diwakili oleh data bilah kipas eksperimen. 9. Tabel 6 dibawah ini merupakan data hasil pengamatan pada proses validasi.

Tabel 6 Data Validasi terhadap data simulasi

Eksperimen Uji	Kipas Aktual	Kipas NACA (AA)	Kipas Tubercle (C3)
Rata-rata	1.41	1.49	1.53
Produk aktual	m/s %	0.08 5,6%	0.12 8,5%
Peningkatan Struktur kepana NACA (AA)	m/s %	0.04 2,7%	

Dari data diatas, didapatkan hasil berupa peningkatan kecepatan aliran angin dari desain *airfoil* NACA (AA) terhadap produk eksisting sebesar 0.08 m/s atau sebesar 5,6%. Peningkatan pada penerapan desain struktur didapatkan sebesar 0.12 m/s atau 8.5% dari produk eksisting dan sebesar 0.04 m/s atau sekitar 2.7% dari Desain Eksisting dengan NACA *airfoil* (AA). Dari hasil pengukuran pada proses validasi didapatkan bahwa peningkatan keuntungan aerodinamis dari penerapan Tabel 7 Hasil Uji Kruskal-Wallis untuk Faktor Amplitudo

Amplitudo	N	Median	Mean Rank	Z-Value
0	4	6.29802	7.0	-0.73
A	4	6.75710	8.5	0.00
B	4	6.86881	8.5	0.00
C	4	7.80058	10.0	0.73
DF		H-Value	P-Value	Method

struktur memberikan peningkatan pada kecepatan aliran angin. Selain itu, dari hasil pengamatan juga ditunjukkan bahwa penerapan basis geometri *airfoil* NACA seri 4 dengan seri NACA-5608 memberikan peningkatan performa pada kecepatan angin yang dihasilkan setelah dilakukan penerapan struktur atau sebelum.

C. Analisis Statistik

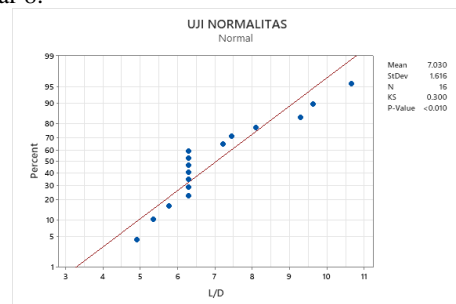
Uji statistik bertujuan untuk mengetahui kepercayaan terhadap data dan performa faktor dan level secara statistik datanya. Tahap awal dilakukan uji normalitas untuk menentukan jenis uji berupa parametrik atau non-parametrik. Pengujian lanjutan terhadap faktor dan level dilakukan untuk memvalidasi secara pasti pada level mana yang memberikan respon paling signifikan terhadap faktornya.

Uji normalitas dilakukan untuk mengetahui apakah data berdistribusi normal atau tidak. Data yang akan digunakan sebagai masukan dalam uji ini adalah data *lift-to-drag ratio* dari 16 desain yang telah dilakukan simulasi. Uji normalitas data menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov dengan hipotesis berupa:

H0 : Data berdistribusi secara normal

H1 : Data bersdistribusi secara tidak normal

Dengan keputusan, H0 ditolak jika P-Value $\leq \alpha$, dengan α adalah 0.05. Hasil pengujian didapatkan seperti pada gambar 8.



Gambar 8 Hasil uji normalitas data simulasi

Gambar 8 menunjukkan nilai P-Value dari data adalah 0,010, dengan data area kritis berupa ≤ 0.05 , sehingga keputusan dari uji normalitas data adalah H0 tidak diterima atau berupa data tidak berdistribusi secara normal. Dengan hasil uji ini, tahap lanjutan uji dilakukan dengan pengujian non-parametrik.

Data uji normalitas yang didapatkan berupa data tidak berdistribusi normal, sehingga analisis variansi hasil akan dilakukan dengan uji non-parametrik menggunakan uji Kruskal-wallis. Pengujian ini ditujukan untuk menentukan adakah perbedaan yang signifikan secara statistik variable independent pada variabel dependen. Berikut merupakan hipotesis pengujian kali ini:

H0 : Perbedaan level pada faktor tidak memberikan efek signifikan pada hasil

H1 : Perbedaan level pada faktor memberikan efek signifikan pada hasil

Dengan keputusan berupa, H0 ditolak jika P-Value $\leq \alpha$, dimana nilai α yang digunakan adalah 0.05. Hasil pengujian untuk faktor amplitudo dan panjang gelombang secara berurutan ditampilkan pada tabel 7 dan Tabel 8.

3	0.79	0.851	Not Adjusted
3	0.87	0.834	Adjusted

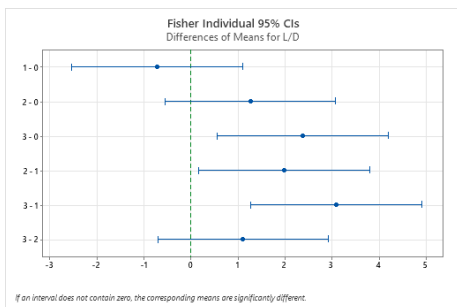
Berdasarkan tabel 7 P-Value dari faktor amplitudo sebesar 0,834, karena nilai lebih besar dari α (0.05) maka perbedaan nilai level yang digunakan tidak memberikan perbedaan hasil yang signifikan. Keadaan ini dimungkinkan karena pada level ke dua atau dengan nilai

1.5 mm, keluaran dari variansi desain memiliki kecenderungan performa yang lebih rendah dari kedua nilai level lainnya

Tabel 8 Hasil Uji Kruskal-Wallis untuk Faktor Panjang Gelombang

Panjang Gelombang	N	Median	Mean Rank	Z-Value
0	4	6.29802	7.0	-0.73
1	4	5.55767	3.3	-2.55
2	4	7.32788	11.0	1.21
3	4	8.86714	12.8	2.06
DF	H-Value	P-Value	Method	
3	9.55	0.023	Not Adjusted	
3	10.41	0.015	Adjusted	

Berdasarkan tabel 8 nilai P-Value dari faktor panjang gelombang didapat sebesar 0,023 untuk metode *not adjusted* dan 0,15 pada metode *adjusted*, karena nilai lebih kecil dari α (0.05) maka perbedaan nilai level dianggap terdapat nilai level yang signifikan atau setidaknya ada satu level yang memberikan pengaruh signifikan terhadap keluaran. Selain itu, didapatkan informasi berupa nilai level yang memberikan signifikansi tertinggi yang diwakilkan dari nilai Z-Value tertinggi (2,06) didapat pada level 3 dengan nilai panjang gelombang sebesar 10 mm. Dengan didefinisikan terdapat sebuah factor yang signifikan, uji lanjutan dilakukan pada faktor panjang gelombang menggunakan *fisher lsd* untuk mengetahui pada perubahan level mana yang memberikan nilai signifikan. Gambar 7 merupakan hasil uji terhadap perubahan nilai level.



Gambar 9 Interval plot pada faktor Panjang gelombang.

Gambar 9 memberikan informasi berupa hubungan antara level signifikan didapatkan ketikan nilai tidak menyentuh garis pada nilai 0, seperti yang terlihat bahwa terdapat tiga pasangan perbandingan level yang memberikan perubahan signifikan pada keluaran simulasi. Hubungan level yang signifikan antara lain sebagai berikut.

- Level 2 terhadap level 1
Hasil perbandingan berpasangan, keluaran simulasi pada level 2 dan 1 memiliki perbedaan yang signifikan, atau terjadi perubahan signifikan terhadap hasil sebelumnya (Level 1)
- Level 3 terhadap level 1
Hasil perbandingan berpasangan diperoleh bahwa perubahan nilai level pada level 3 jika dibandingkan dengan level 1 memberikan hasil yang signifikan terhadap keluaran simulasi.
- Level 3 terhadap level 0
Hasil perbandingan berpasangan diperoleh bahwa perubahan nilai level pada level 3 jika dibandingkan dengan level 0 memberikan hasil yang signifikan terhadap keluaran simulasi. Perbandingan level ini juga memperlihatkan perbandingan antara desain awal (AA) yang menggunakan level 0 atau tak bergelombang dengan desain optimal (C3) yang menggunakan level 3 (10 mm)

V. KESIMPULAN

Peningkatan keuntungan aerodinamis diperoleh dengan penerapan Struktur *Tubercle Leading Edge* yang di inspirasikan dari Sirip Paus Bungkuk. Hal ini ditunjukkan dari hasil rata-rata rasio *lift-to-drag* yang lebih baik jika dibandingkan dari hasil pada desain awal (AA) khususnya pada desain terpilih atau desain optimal (C3). Parameter optimal dari struktur diterapkan pada studi ini didapatkan pada eksperimen dengan desain C3 dengan faktor penyusun struktur yang digunakan berupa amplitudo sebesar 3.5% Cb atau 2,1 mm dan panjang gelombang sebesar 1/6 Cb atau 10 mm. Peningkatan sebesar 9% *lift* dan penurunan sebesar 36% pada drag atau sebesar 69% peningkatan rasio *lift-to-drag* didapatkan pada desain terpilih C3 (di bandingkan terhadap perolehan desain awal (AA)). Didasarkan dari hasil akhir desain terpilih yang kemudian dilakukan proses validasi dengan prosedur uji terkait, didapatkan kesimpulan berupa peningkatan keuntungan aerodinamis (rasio *lift-to-drag*) yang didapatkan berhasil memberikan peningkatan kestabilan pada kecepatan aliran udara pada bilah kipas. Hal tersebut didasarkan dari data rata-rata nilai kecepatan angin desain terpilih (C3) terhadap produk eksisting yang meningkat sebesar 8,04%. Penggunaan Metode Taguchi sebagai desain eksperimen yang dikombinasikan dengan simulasi CFD Fluent dinilai cocok terhadap kasus pada studi ini.

REFERENSI

- Lee, Y. T., & Lim, H. C. (2016). Performance assessment of various fan ribs inside a centrifugal blower. *Energy*, *94*, 609–622. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.007>
- Ketata, A., Driss, Z., & Abid, M. S. (2020). Impact of blade number on performance, loss and flow characteristics of one mixed flow turbine. *Energy*, *203*, 117914. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117914>
- Gudmundsson, S. (2014). The Anatomy of the Airfoil. In *General Aviation Aircraft Design*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-397308-5.00008-8>
- Huang, C. H., & Gau, C. W. (2012). An optimal design for axial-flow fan blade: Theoretical and experimental studies. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *26*(2), 427–436. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-1030-7>
- Sanjeevi, S. K. P., Kuipers, J. A. M., & Padding, J. T. (2018). Drag, lift and torque correlations for non-spherical particles from Stokes limit to high Reynolds numbers. *International Journal of Multiphase Flow*, *106*, 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.05.011>
- Wang, Z., Wang, Y., & Zhuang, M. (2018b). Improvement of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines with leading-edge serrations and helical blades using CFD and Taguchi method. *Energy Conversion and Management*, *177*(May), 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.028>
- Corsini, A., Delibra, G., & Sheard, A. G. (2013). On the role of leading-edge bumps in the control of stall onset in axial fan blades. *Journal of Fluids*

- Engineering, Transactions of the ASME*, 135(8), 1–9. <https://doi.org/10.1115/1.4024115>
- 8 Lubis, M. M. (2012). Analisis Aerodinamika Airfoil NACA 2412 Pada Sayap Pesawat Model Tipe Glider dengan Menggunakan Software Berbasis Computational Fluid Dynamics untuk Memperoleh Gaya Angkat Maksimum. *Jurnal E-Dinamis*, II(2), 23–33.
- 9 Aftab, S. M. A., Razak, N. A., Mohd Rafie, A. S., & Ahmad, K. A. (2016). Mimicking the humpback whale: An aerodynamic perspective. *Progress in Aerospace Sciences*, 84, 48–69. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.03.002>

- 1 Ivanić, K.-Z., Tadić, Z., & Omazić, M. (2015). BIOMIMICRY – AN OVERVIEW. *The Holistic Approach to Environment*.
- 1 Fish, F. E., & Battle, J. M. (1995). Hydrodynamic design of the humpback whale flipper. *Journal of Morphology*, 225(1), 51–60. <https://doi.org/10.1002/jmor.1052250105>
- 1 Watts, P., & Fish, F. E. (2001). The influence of passive, leading edge tubercles on wing performance. *Proc. Twelfth Intl. Symp. Unmanned Untethered Submers. Technol., Durham New Hampshire*, 2–9. http://www.otherpower.com/images/scimages/2637/leading_edge_tubercles.pdf

