

## Kajian Keserupaan Parameter Kinerja Miniatur dan Prototipe Turbin Angin Sumbu Horizontal

Deny Bayu Saefudin<sup>1</sup>, Wirawan Pisen<sup>2</sup> dan Rachman Hakim<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Jenderal Achmad Yani

<sup>3</sup>Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung

[deny.bayusaefudin@lecture.unjani.ac.id](mailto:deny.bayusaefudin@lecture.unjani.ac.id), [wirawan.pisen@lecture.unjani.ac.id](mailto:wirawan.pisen@lecture.unjani.ac.id), [rachmanhakim@students.itb.ac.id](mailto:rachmanhakim@students.itb.ac.id)

### Abstrak

Pengujian kinerja turbin angin sumbu horizontal yang berukuran besar dapat disederhanakan dengan prinsip keserupaan. Prinsip tersebut memungkinkan prediksi karakter turbin berukuran besar (prototipe) dapat dilakukan dengan menggunakan model yang berukuran lebih kecil (miniatur). Ukuran miniatur yang cenderung kecil diharapkan dapat memudahkan proses pengujian dan meminimalisir biaya pembuatan spesimen uji. Teori keserupaan dapat digunakan pada kasus aerodinamika dengan syarat kesamaan nilai bilangan *Reynolds* dan bilangan *Mach* dari prototipe dan miniatur terpenuhi. Penelitian kali ini membahas keserupaan parameter kinerja prototipe dan miniatur turbin dari hasil simulasi numerik dengan menggunakan teori momentum-elemen bilah yang dilengkapi beberapa faktor koreksi. Hasil ini nantinya digunakan sebagai dasar pengujian kinerja pada penelitian selanjutnya. Pada awal proses simulasi, terdeteksi bahwa kesamaan nilai bilangan *Reynolds* antara prototipe dan miniatur dapat terjaga. Hal ini dilakukan dengan cara menaikkan nilai kecepatan angin pengujian miniatur secara proporsional sesuai dengan pengecilan dimensi turbin akibat proses penskalaan. Namun, nilai bilangan *Mach* keduanya terlihat berbeda cukup besar. Tercatat di posisi sekitar 50% hingga 80% panjang bilah, nilai rerata bilangan *Mach* untuk prototipe sebesar 0,02 dan miniatur sebesar 0,191. Terlihat bahwa nilai bilangan *Mach* pada prototipe turbin termasuk pada kategori *incompressible* sedangkan pada miniatur sudah masuk di kategori *compressible*. Meski begitu, ternyata perbedaan nilai bilangan *Mach* tersebut tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perbedaan karakter kinerja prototipe dan miniatur turbin. Hal ini dapat dilihat dari rerata simpangan koefisien daya sebesar dan koefisien gaya tangensial sebesar 2,3% serta koefisien gaya dorong yang hanya sebesar 1,4%.

Kata kunci: Turbin angin, miniatur, efisiensi, bilangan *reynolds*, keserupaan.

### 1. Pendahuluan

Protokol Kyoto 1998 tentang perubahan iklim merupakan cikal bakal dari seluruh langkah pengembangan energi baru dan terbarukan di segala penjuru bumi, salah satunya yang berasal dari angin. Tercatat semenjak 2001 hingga kuartal ketiga 2017 Amerika Serikat telah menaikkan angka produksi penghasilan listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dari semula 4MW menjadi 85MW (American Wind Energy Association, 2017). Data statistik yang dihimpun oleh Berkeley Lab menunjukkan bahwa hingga akhir 2015, empat negara di benua eropa telah sukses menempatkan pasokan energi listrik di atas 20% pasokan listrik total untuk masyarakatnya (Pyper, 2016). Indonesia sendiri merencanakan bahwa porsi energi baru dan terbarukan dalam bauran energi nasional ditargetkan mencapai angka 23% pada 2025, dan 31% pada 2050, dari angka 11.9% di tahun 2017 ini (KataData, 2017; Simorangkir, 2017). Pengembangan teknologi energi baru dan terbarukan, termasuk di dalamnya adalah energi angin, diatur dan didukung oleh pemerintah lewat PP No. 79, Tahun 2014. Salah satu karya bangsa dalam bentuk produk PLTB ukuran kecil yaitu Penari Langit 500Wp yang dikembangkan oleh Lentera Angin Nusantara (LAN, saat ini berubah menjadi Lentera Bumi Nusantara, LBN). Penari Langit adalah nama dari sebuah produk berupa PLTB yang memiliki diameter  $\pm 2$  m dengan kapasitas 500Wp pada kecepatan angin *rated* sekitar 10 m/s. Turbin tersebut telah terpasang di 4 desa di daerah Sumba, NTT, dengan jumlah total sebanyak 100 unit sejak 2014 (Lentera Bumi Nusantara, 2015).

Penelitian kali ini merupakan lanjutan dari penelitian sebelumnya mengenai pemodelan kekuatan bilah turbin skala penuh terhadap proses pembebanan operasi (Ikaningsih & Saefudin, 2018). Pada penelitian kali ini akan dibahas pengujian virtual kinerja aerodinamika dari bilah turbin Penari Langit. Pengujian virtual ini dilakukan untuk dasar pelaksanaan pengujian fisik di kemudian hari dalam skala laboratorium. Pengujian fisik pada skala laboratorium dilakukan untuk pengembangan produk tersebut. Hal ini dilakukan sebagai langkah peninjauan kerjasama antara pihak LAN dan Universitas Jenderal Achmad Yani. Pengujian skala laboratorium tersebut melibatkan fasilitas uji yang

#### Info Makalah:

Dikirim : 10-16-2018;

Revisi 1 : 10-25-2018;

Revisi 2 : 11-28-2018;

Diterima : 11-28-2018.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +62-8154-6352-84

e-mail : [deny.bayusaefudin@lecture.unjani.ac.id](mailto:deny.bayusaefudin@lecture.unjani.ac.id)

berukuran lebih kecil dibanding turbin Penari Langit. Maka dari itu, proses penskalaan menjadi penting. Turbin ukuran sebenarnya (prototipe) akan diskalakan dengan didasari hasil kajian proses pembuatan miniaturnya. Miniatur yang telah ditentukan dimensinya akan diprediksi keserupaan nilai parameter kinerjanya dengan prototipe melalui pengujian virtual ini. Pengujian virtual tersebut dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak QBlade yang dikembangkan oleh David Marten, dkk. Perangkat lunak ini

menggunakan teori momentum-elemen bilah sebagai dasar perhitungan (Marten, 2015; Marten & Wendler, 2013b, 2013a).

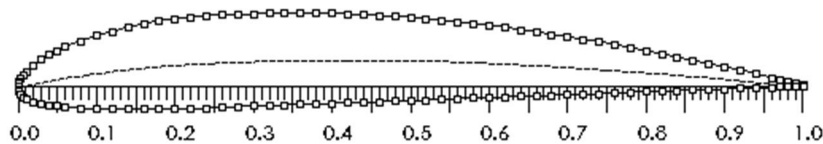
Kajian utama penelitian ini adalah keserupaan karakter parameter kinerja antara prototipe dan miniaturnya. Kasus tentang turbin angin tergolong pada kasus aerodinamika. Sehingga teori keserupaannya pun melibatkan beberapa parameter-parameter non-dimensional dalam ranah aerodinamika. Metode pengujian dengan melibatkan teori keserupaan ini telah dilakukan oleh beberapa periset turbin angin dan menghasilkan data yang cukup baik. Pengujian turbin angin dengan skala 1/45 dilakukan oleh (Bottasso, Campagnolo, & Petrović, 2014) menghasilkan data yang mirip dengan kondisi aslinya. Pengujian ini dikontrol dengan memastikan beberapa parameter non-dimensional untuk gejala-gejala aerodinamika antara prototipe dan miniatur memiliki nilai yang sama. Parameter tersebut antara lain adalah bilangan *Reynolds*, bilangan *Mach*, bilangan Lock, dan *Tip Speed Ratio*.

Pengujian lain yang memiliki bentuk spesimen berbeda tercatat dilakukan oleh beberapa peneliti lainnya. Meski objek penelitiannya berbeda dengan penelitian yang disebutkan sebelumnya, prinsip dasar pengujiannya masih sama yakni kesamaan nilai parameter non-dimensional. Jika kesamaan nilai parameter-parameter tersebut dapat terjaga, maka hasil pengujian kinerja prototipe dan miniatur pun akan memberikan hasil yang mirip. Pengujian untuk miniatur turbin angin horisontal tipe *counter-rotates* oleh (Mitulet dkk., 2015) dilakukan untuk prediksi kinerja prototipe yang memiliki nilai daya keluaran 15 kali dari miniaturnya. Pada (Kuester dkk., 2015) pengujian airfoil untuk diaplikasikan pada proses desain turbin angin skala besar dilakukan di terowongan angin dengan skala tertentu. Beberapa topik tentang pengujian turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus serta *casing* yang berfungsi sebagai pengarah aliran angin dilakukan dengan menerapkan prinsip pemodelan memberikan hasil berupa prediksi data yang identik untuk prototipe dan miniatur (Fazlizan dkk., 2012; Scungio, Arpino, Focanti, Profili, & Rotondi, 2016).

## 2. Metode

### Prototipe Bilah Turbin

Bilah turbin yang digunakan pada penelitian kali ini memiliki panjang total 970 mm, dengan panjang bagian efektif 830 mm. Bentuk airfoil yang digunakan sebagai penampang bilah adalah Clark Y, seperti terlihat pada Gambar 1. Lebar bilah (panjang *chord*) dari pangkal hingga ujung sama besar, yakni 120 mm. Nilai lebar bilah yang seragam dari pangkal hingga ujung tersebut menyebabkan bilah ini dapat dikategorikan sebagai bilah tipe *taperless*. Sudut *pitch* airfoil dari pangkal hingga ujung dibuat linear dengan nilai 12,4° hingga 4°. Bagian bilah yang digunakan untuk menempelkan bilah ke rotor memiliki panjang 140 mm, lebar 120 mm dan tebal 30 mm (Simanjuntak, 2015).



Gambar 1. Airfoil Clark Y.

### Desain Miniatur Bilah

Selain didasari oleh faktor proses manufakturnya, dimensi miniatur yang akan dibuat disesuaikan pula dengan alat uji yang tersedia di Laboratorium Konversi Energi, Unjani. Alat uji yang akan digunakan adalah terowongan angin tipe *suction* dengan geometri penampang daerah pengujian terowongan angin berbentuk persegi berukuran 350 mm x 350 mm dengan *chamfer* di setiap sudutnya berukuran 50 mm x 45°. Dimensi penampang daerah uji ini digunakan sebagai acuan perhitungan skala atau dimensi miniatur.

Adapun proses manufaktur bilah miniatur turbin angin akan menggunakan *3D printer*. Bahan yang digunakan adalah *regular ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) wire* untuk *Generic 3D printer* tipe FFF (*Fused Filament Fabrication*). Ketebalan minimum yang mampu dibuat oleh *3D printer* ini menjadi salah satu dasar penentuan dimensi miniatur.

### Parameter Non-Dimensional

Parameter non-dimensional yang pertama adalah bilangan *Reynolds* (*Re*). Bilangan tersebut merupakan sebuah parameter yang menggambarkan rasio gaya inersia aliran terhadap gaya yang muncul akibat adanya pengaruh kekentalan fluida (Munson, Okiishi, Huebsch, & Rothmayer, 2013). Rasio ini dikemukakan oleh Osborne Reynolds, dan digunakan pertama kalinya untuk menunjukkan kriteria pembeda antara aliran laminar dan turbulen. Bilangan *Reynolds* ini dipengaruhi oleh massa jenis fluida ( $\rho$ ), kecepatan aliran, panjang karakteristik dan viskositas absolut fluidanya ( $\mu$ ).

$$Re = \frac{\rho \cdot W \cdot c}{\mu} \quad (1)$$

Pada kasus desain bilah turbin angin, panjang karakteristik diganti dengan panjang *chord* airfoil atau lebar bilah (*c*). Kecepatan aliran digantikan dengan kecepatan relatif (*W*) yang besarnya berbeda-beda dari pangkal hingga ujung bilah. Karakteristik aliran pada pengujian prototipe dan miniatur akan identik apabila bilangan *Reynolds* keduanya sama.

Selain bilangan *Reynolds*, beberapa parameter non-dimensional lain yang digunakan dalam penelitian ini yaitu, bilangan *Mach* (*Ma*), *Tip Speed Ratio* (*TSR*), koefisien daya, koefisien gaya angkat dan koefisien gaya hambat. Bilangan *Mach* adalah parameter yang menandakan keserupaan sifat kompresibilitas fluida (Munson dkk., 2013). Bilangan ini membandingkan nilai kecepatan aliran dengan kecepatan rambat suara pada fluida tersebut. Pada kasus aliran yang melibatkan gas, kategorisasi aliran *compressible* atau *incompressible* dilihat dari nilai bilangan *Mach* alirannya. Secara umum diketahui bahwa jika aliran gas memiliki kondisi  $Ma > 0,1$  kasus alirannya masuk pada kategori aliran *compressible*. Sedangkan jika aliran gas memiliki kondisi  $Ma \leq 0,1$  kasus alirannya dapat disederhanakan menjadi kategori *incompressible* (Fluent Inc., 2001). fluida *TSR* adalah parameter yang membandingkan kecepatan tangensial ujung bilah dengan kecepatan angin masuk. Sedangkan koefisien daya, gaya angkat dan gaya hambat merupakan faktor pengali sebagai hasil perbandingan antara parameter momentum aliran dengan parameter aktualnya masing-masing (Manwel, McGowan, & Rogers, 2009).

$$Ma = \frac{W}{V_S} \quad (2)$$

$$TSR = \frac{U_{tip}}{V} \quad (3)$$

$$Cp = \frac{P_{turbin}}{P_{aliran}} \quad (4)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho A W^2} \quad (5)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A W^2} \quad (6)$$

### **Blade Element Momentum Theory (BEMT).**

*Blade element momentum theory* atau teori momentum-elemen bilah merupakan gabungan dari teori momentum yang dikemukakan pertama kali oleh Rankine-Froude pada tahun 1878, dengan teori elemen bilah (Manwel dkk., 2009). Teori momentum, biasa disingkat MT (*momentum theory*), yang dikemukakan oleh Rankine dan Froude dimodifikasi pertama kali oleh Betz di tahun 1921 dan kemudian disempurnakan oleh Glauert pada tahun 1926. Teori tersebut berisi tentang model matematik untuk perhitungan daya ideal turbin angin, gaya dorong angin terhadap turbin dan efek operasi turbin terhadap kondisi angin sekitar dengan menerapkan prinsip perhitungan momentum linier pada model *actuator disk*. Sedangkan teori elemen bilah, atau biasa disingkat BET (*blade element theory*), menjelaskan prinsip perhitungan gaya-gaya aerodinamika bilah secara elemental. Parameter-parameter yang dihitung secara elemental tersebut, kemudian diintegrasikan untuk mendapatkan nilai totalnya. Gabungan dari MT dan BET, yaitu BEMT, menyatakan bahwa nilai gaya dorong dan torka dari MT sama dengan BET. Kesamaan nilai parameter tersebut akan memberikan gambaran nilai *linear* dan *rotational induced flow factor* pada aliran yang masuk ke turbin. Kedua parameter *induced flow factor* tersebut didapatkan melalui perhitungan yang bersifat iteratif dari persamaan 7 hingga persamaan 12.

$$dT_{MT} = \rho V^2 4a(1-a)\pi r dr \quad (7)$$

$$dQ_{MT} = 4a'(1-a)\rho V \pi r^3 \Omega dr \quad (8)$$

$$dT_{BET} = B \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) c dr \quad (9)$$

$$dQ_{BET} = B \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) c r dr \quad (10)$$

$$\frac{a'}{(1-a)} = \frac{\sigma' C_L}{4\lambda_r \sin \varphi} \quad (11)$$

$$\frac{a}{(1-a)} = \frac{\sigma' C_L \cos \varphi}{4 \sin^2 \varphi} \quad (12)$$

$$\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (13)$$

$$P_{turbin} = \int_{r_{hub}}^R \Omega dQ \quad (14)$$

$$P_{aliran} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (15)$$

### Faktor-faktor Koreksi Kerugian (*Loss Correction Factors*)

Beberapa faktor koreksi yang digunakan untuk menambah tingkat keakuratan perhitungan BEMT diantaranya yaitu:

1. Faktor koreksi 3D (Bot & Ceyhan, 2011)

Penggunaan faktor koreksi ini akan mengubah nilai koefisien gaya angkat dari hasil simulasi ataupun data eksperimen dengan aliran 2D menjadi nilai koefisien gaya angkat 3D. Perbedaan keduanya terletak pada pengaruh gaya aerodinamika dari aliran radial yang muncul akibat perputaran bilah turbin.

$$C_{L,3D} = C_{L,2D} + \frac{3,1(TSR^2)}{1+(TSR^2)} g \left( \frac{c}{r} \right)^2 \left( \frac{dC_L}{d\alpha} \right)_{linear} \sin(\alpha - \alpha_0) - C_{L,2D} \quad (16)$$

Dimana nilai  $g$  memiliki ketentuan sebagai berikut:

$$g = \begin{cases} 1 & , 0 < \alpha < 30 \\ 0.5(1 + \cos(6\alpha - 180)) & , 30 < \alpha < 60 \\ 0 & , 60 < \alpha < 360 \end{cases} \quad (17)$$

2. Faktor koreksi baru untuk ujung dan pangkal bilah (Shen, Zhu, & Sørensen, 2014)

Penggunaan faktor koreksi Prandtl yang dimodifikasi oleh Shen, dkk menunjukkan hasil yang cukup baik untuk menggambarkan penurunan kinerja turbin akibat kerugian aliran di bagian ujung dan pangkal bilah. Faktor koreksi yang dihitung ( $F_{hub}$  dan  $F_{tip}$ ) akan dioperasikan dengan persamaan gaya dorong dan torka turbin angin dari teori momentum ( $dT_{MT}$  dan  $dQ_{MT}$ ). Persamaan berikut menggambarkan hubungan antara gaya dari teori momentum setelah dan sebelum dikalikan faktor koreksi.

$$\begin{aligned} dT_{MT,loss\ corrected} &= F dT_{MT,no\ loss} \\ dQ_{MT,loss\ corrected} &= F dQ_{MT,no\ loss} \end{aligned} \quad (18)$$

Dimana nilai  $F$  ditentukan oleh kondisi elemen yang dihitung sesuai kondisi berikut

$$F = \begin{cases} F_{hub} & \text{jika } r \leq 0,8R \\ F_{tip} & \text{jika } r > 0,8R \end{cases} \quad (19)$$

$$F_{hub} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \exp \left( h \frac{-B(r-r_{hub})^m}{2r^m \sin\phi} \right) \right] \quad (20)$$

$$F_{tip} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \exp \left( h \frac{-B(R-r)^m}{2r^m \sin\phi} \right) \right] \quad (21)$$

Variabel  $h$  dan  $m$  masing-masing dihitung dengan persamaan berikut:

$$h = \exp \left( - \frac{0,125(B(TSR) - 21)}{1 - 2 \min(dc/dr)} \right) + 0,1 \quad (22)$$

$$m = 1 + 0,5 \min(dc/dr) \quad (23)$$

3. Faktor koreksi gaya hambat *Reynolds* (Hernandez & Crespo, 1987)

Perubahan nilai gaya hambat dan koefisiennya pada saat terjadi perubahan bilangan *Reynolds* dirumuskan melalui persamaan berikut ini:

$$C_D = C_{D,ref} \left( \frac{Re_{ref}}{Re} \right)^{0,2} \quad (24)$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### Hasil Proses Penskalaan

Skala miniatur turbin terhadap prototipenya ditetapkan sebesar 3:25. Nilai faktor skala tersebut didapat dari hasil perhitungan dan pengambilan keputusan yang didasari oleh pertimbangan proses manufaktur dan dimensi daerah uji terowongan angin di laboratorium.

Vendor *3D printer* menyarankan agar ketebalan minimum benda yang diproses adalah 1 mm. Jika ketebalan benda kurang dari 1 mm, maka hasil pencetakannya akan berongga-rongga seperti spons. Hal ini tentu saja dihindari, karena akan menyulitkan proses *finishing* permukaan hasil cetakan sebelum digunakan untuk pengujian. Proses *finishing* yang merupakan proses penutupan rongga kecil (*filling*) dan penghalusan permukaan (*sanding and polishing*) dilakukan untuk menjamin karakter aerodinamika bilah saat diuji sesuai dengan desainnya.

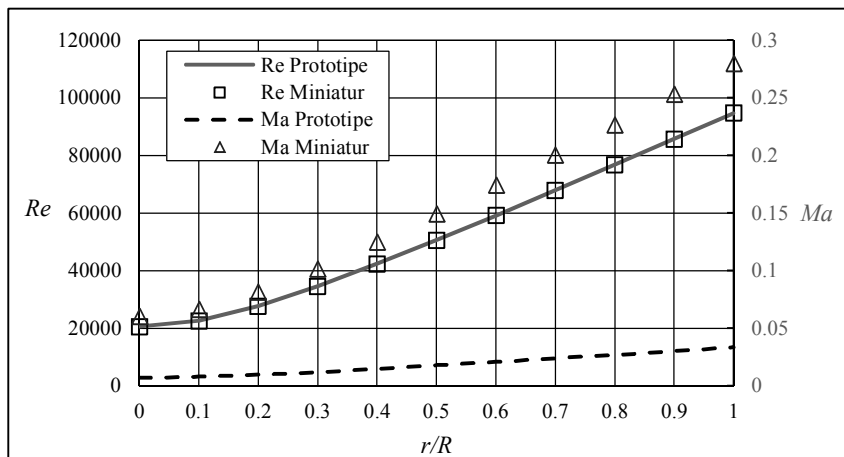
Tabel 1. Perbandingan Parameter Utama Prototipe dan Miniatur Turbin.

Parameter	Prototipe	Miniatur
Skala	1 : 1	3 : 25
Diameter Turbin [mm]	2000	240
Panjang Bilah [mm]	830	99,6
Lebar Chord [mm]	120	14,4
Tebal Bilah Maks. [mm]	13,9	1,7
TSR	4,5	4,5

Perhitungan dimensi dari faktor skala yang ditentukan (seperti terlihat pada Tabel 1) menunjukkan bahwa diameter miniatur turbin lebih kecil dari dimensi penampang daerah uji terowongan angin. Jarak dari ujung bilah miniatur turbin ke dinding terowongan angin masing-masing di sisi kanan dan kiri terhitung sekitar 5 cm. Hal ini menandakan bahwa dimensi miniatur cukup sesuai untuk diuji di terowongan angin yang telah tersedia.

#### Hasil Perhitungan Awal

Langkah awal perhitungan dimulai dari perhitungan nilai kecepatan angin masuk (kecepatan absolut aliran,  $V$ ), kecepatan tangensial elemental bilah ( $U$ ) dan kecepatan relatif aliran ( $W$ ). Setelah tiga parameter kecepatan tersebut terhitung, selanjutnya bilangan *Reynolds* dan bilangan *Mach* di sepanjang bilah dihitung secara elemental.



Gambar 2. Kurva Distribusi Bilangan *Reynolds* dan Bilangan *Mach* untuk Prototipe serta Miniatur Turbin

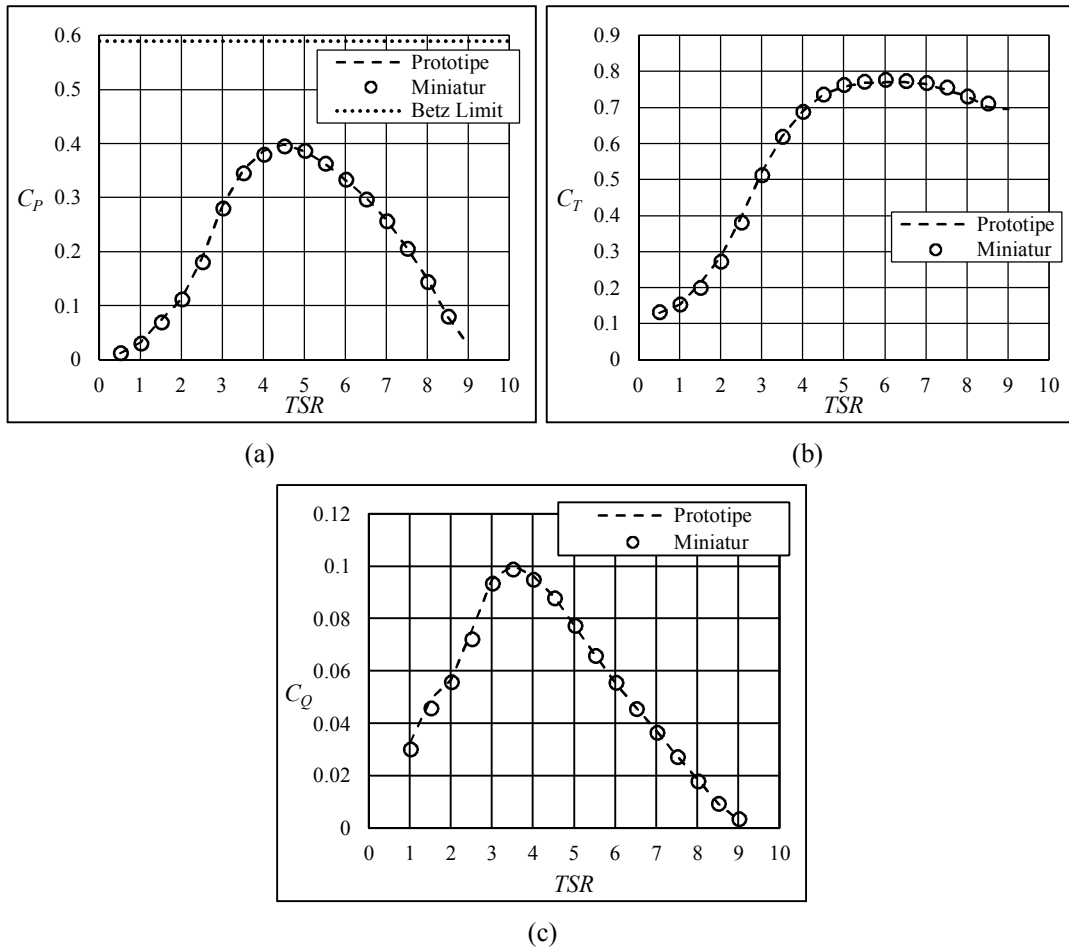
Kurva distribusi bilangan *Reynolds* prototipe dan miniatur turbin terlihat saling berhimpitan. Hal ini terjadi karena pada saat dimensi prototipe diperkecil menjadi miniatur dengan faktor pengali 3:25, maka kecepatan aliran diperbesar dengan faktor pengali yang setara. Sehingga jika dihitung, bilangan *Reynolds* prototipe dan miniatur akan sama besar.

Lain halnya dengan bilangan *Mach*, akibat pembesaran nilai kecepatan relatif yang melewati penampang bilah dengan lebar tertentu, maka nilai bilangan tersebut untuk prototipe dan miniatur berbeda satu sama lain. Terlihat pada kurva di Gambar 2, nilai bilangan *Mach* di sepanjang bilah prototipe masih terjaga pada nilai di bawah 0,1. Hal ini memberikan indikasi bahwa pengaruh kompresibilitas fluida (udara) tidak terlalu berpengaruh pada aliran, sehingga dapat diabaikan. Berbeda halnya dengan distribusi nilai bilangan *Mach* di sepanjang bilah miniatur dimana sekitar 70% daerah bilah terpengaruh oleh faktor kompresibilitas. Hal ini mungkin saja mempengaruhi perhitungan untuk simulasi aerodinamika airfoil bilah turbin, sehingga kemungkinan besar nilai beberapa parameter pada *polar data* airfoil untuk prototipe dan miniatur akan berbeda.

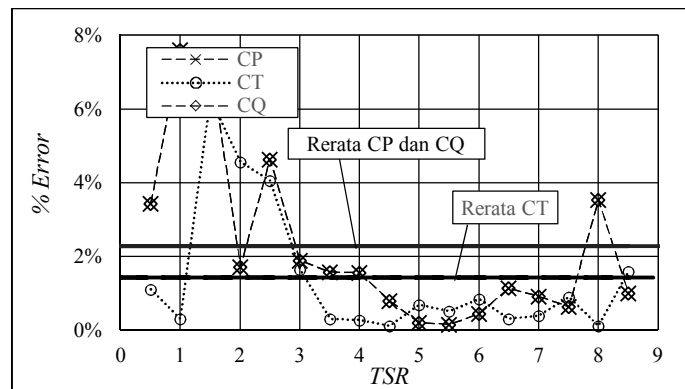
**Hasil Simulasi**

Meskipun nilai bilangan *Mach* dan faktor kompresibilitas fluida terhadap aliran di sepanjang bilah prototipe turbin berbeda dengan miniaturnya, kesamaan nilai bilangan *Reynolds* ternyata dapat menjaga keserupaan keduanya. Hal ini ditunjukkan oleh hasil simulasi menggunakan Qblade pada Gambar 3. Gambar tersebut menunjukkan bahwa parameter kinerja miniatur dan prototipe turbin dapat dinyatakan serupa.

Kesimpulan tersebut didasari oleh perbedaan nilai masing-masing parameter ( $C_P$ ,  $C_T$  dan  $C_Q$ ) untuk miniatur dan prototipe yang terlihat pada Gambar 4. Pada gambar tersebut terlihat bahwa nilai persentase simpangan (*error*) rata-rata untuk  $C_P$ ,  $C_T$  dan  $C_Q$  terlihat masih di bawah 5%. Tercatat bahwa rerata simpangan untuk  $C_P$  dan  $C_Q$  adalah sama, yakni 2,3%. Sedangkan rerata  $C_T$  tercatat 1,4%. Adapun besar persentase simpangan tertinggi yang tercatat untuk  $C_P$  dan  $C_Q$  adalah 18,1% pada nilai TSR 9 dapat dikesampingkan pengaruhnya karena nilai  $C_P$  dan  $C_Q$  kondisi tersebut sangatlah kecil (mendekati nol).

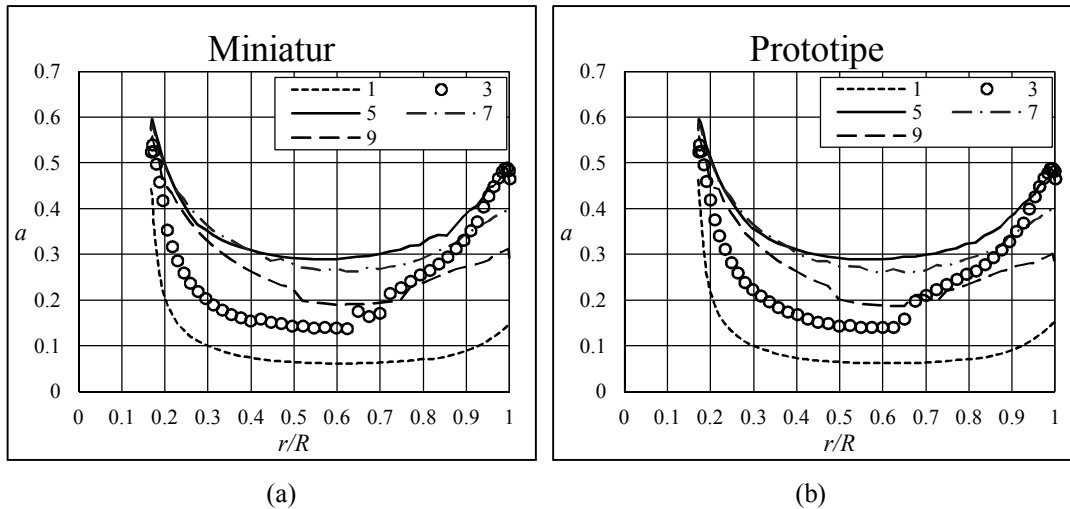


Gambar 3. Kurva Parameter Kinerja Prototipe dan Miniatur Turbin Angin  
 (a) Koefisien Daya (b) Koefisien Gaya Dorong (c) Koefisien Torqa.

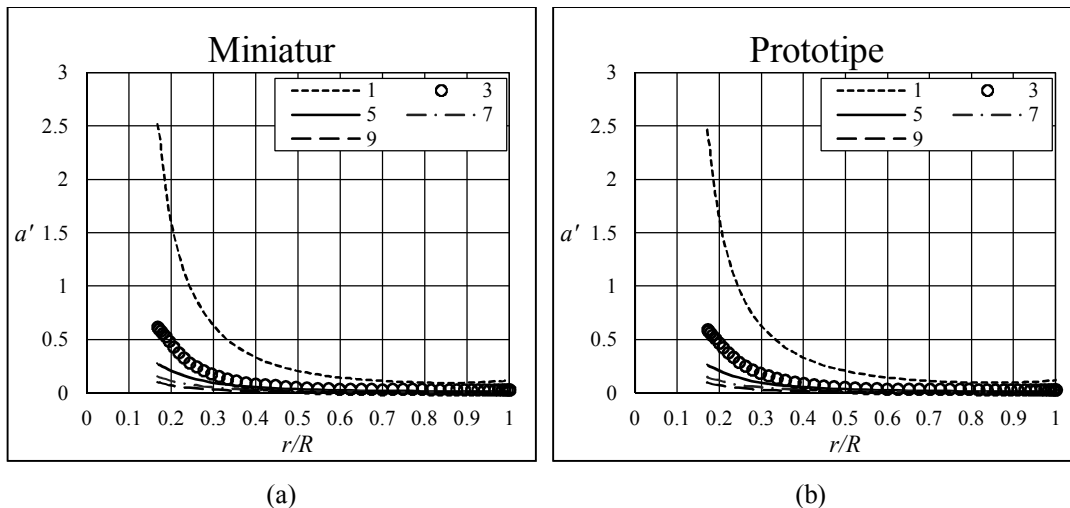


Gambar 4. Persentase *Error* Parameter Kinerja Miniatur terhadap Prototipe Turbin Angin.

Selain kurva parameter seperti yang tampak pada Gambar 3 dan Gambar 4, parameter lain yang perlu dilihat kesamaannya adalah *linear induced flow factor* ( $a$ ) dan *rotational induced flow factor* ( $a'$ ). Kedua hal tersebut menandakan karakter aliran *freestream* angin sesaat sebelum masuk ke turbin dalam arah aksial dan tangensial. Karakter  $a$  di sepanjang bilah miniatur dan prototipe turbin angin pada beberapa kondisi TSR ditunjukkan oleh Gambar 5. Sedangkan karakter  $a'$  ditunjukkan pada Gambar 6. Pada kedua gambar tersebut kurva karakter  $a$  dan  $a'$  miniatur turbin angin sama dengan kurva milik prototipe. Kesamaan bentuk kurva tersebut menggambarkan kesamaan karakter aliran yang masuk ke dalam turbin dan berdampak pada kesamaan karakter koefisien gaya angkat dan gaya hambat airfoil. Hasil akhirnya akan membuat koefisien gaya dorong angin, koefisien torka dan koefisien daya turbin angin untuk miniatur turbin identik dengan koefisien-koefisien milik prototipe.



Gambar 5. Kurva *Linear Induced Flow Factor* pada Beberapa Kondisi TSR untuk  
(a) Miniatur Turbin Angin (b) Prototipe Turbin Angin.



Gambar 6. Kurva *Rotational Induced Flow Factor* pada Beberapa Kondisi TSR untuk  
(a) Miniatur Turbin Angin (b) Prototipe Turbin Angin.

### Kesimpulan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kinerja miniatur dan prototipe turbin angin memiliki kesamaan karakter atau dapat dikatakan serupa. Hal tersebut ditunjukkan oleh kemiripan bentuk kurva parameter-parameter tak berdimensi seperti koefisien daya, koefisien gaya dorong, koefisien torka, *linear induced flow factor* dan *rotational induced flow factor*.

Keserupaan karakter kinerjanya dipengaruhi oleh kesamaan nilai bilangan *Reynolds* dari miniatur dan prototipe. Kesamaan nilai bilangan *Reynolds* keduanya akan mempengaruhi besar rasio kecepatan angin untuk pengujian miniatur terhadap kecepatan angin operasional prototipe turbin. Semakin kecil miniatur turbin angin, maka semakin besar pula kecepatan angin yang dibutuhkan untuk pengujian miniatur tersebut.

Perbedaan yang cukup signifikan pada nilai bilangan *Mach* prototipe turbin dan miniaturnya tidak memberikan pengaruh besar terhadap perbedaan karakter kinerja keduanya. Hal ini mungkin saja hanya berlaku untuk kasus dimana

nilai bilangan *Mach* terbesar di sepanjang bilah terhitung kurang dari 0,3. Pengaruh lebih lanjut mengenai perbedaan nilai bilangan ini masih perlu dikaji melalui eksperimen.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Jenderal Achmad Yani atas dukungan finansialnya, serta Lentera Angin Nusantara (LAN) atas dukungan serta keterlibatan para ahlinya dalam diskusi pada penelitian ini.

### Daftar Notasi

$Re$	=	Bilangan <i>Reynolds</i>
$\rho$	=	Massa jenis fluida [ $\text{kg/m}^3$ ]
$W$	=	Kecepatan relatif aliran [ $\text{m/s}$ ]
$c$	=	Panjang <i>chord</i> /lebar bilah [ $\text{m}$ ]
$\mu$	=	Viskositas absolut/dinamik [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
$Ma$	=	Bilangan <i>Mach</i>
$V_s$	=	Kecepatan rambat gelombang suara [ $\text{m/s}$ ]
$TSR$	=	<i>Tip Speed Ratio</i>
$U_{tip}$	=	Kecepatan tangensial di ujung bilah [ $\text{m/s}$ ]
$V$	=	Kecepatan absolut aliran/angin masuk [ $\text{m/s}$ ]
$C_p$	=	Koefisien daya
$C_T$	=	Koefisien gaya dorong
$C_Q$	=	Koefisien torka
$P_{turbin}$	=	Daya turbin [ $\text{W}$ ]
$P_{aliran}$	=	Daya aliran [ $\text{W}$ ]
$C_L$	=	Koefisien gaya angkat
$L$	=	Gaya angkat [ $\text{N}$ ]
$A$	=	Luas [ $\text{m}^2$ ]
$C_D$	=	Koefisien gaya hambat
$D$	=	Gaya hambat [ $\text{N}$ ]
$T$	=	<i>Thrust</i> /gaya dorong angin [ $\text{N}$ ]
$Q$	=	Torka turbin angin [ $\text{N}$ ]
$a$	=	<i>Linear induced flow factor</i>
$a'$	=	<i>Rotational induced flow factor</i>
$r$	=	Jari-jari lokal/posisi elemen [ $\text{m}$ ]
$R$	=	Jari-jari turbin [ $\text{m}$ ]
$\Omega$	=	Kecepatan sudut turbin angin [ $\text{rad/s}$ ]
$B$	=	Jumlah bilah turbin angin [buah]
$\varphi$	=	Sudut <i>pitch</i> [ $^\circ$ ]
$\lambda_r$	=	<i>TSR</i> lokal
$\sigma'$	=	Soliditas lokal
$\alpha$	=	Sudut serang airfoil [ $^\circ$ ]
$F$	=	Faktor koreksi baru untuk ujung dan pangkal bilah

### Daftar Pustaka

- American Wind Energy Association. (2017). Wind Energy Facts at a Glance. Diambil 19 Desember 2017, dari <https://www.awea.org/Resources/Content.aspx?ItemNumber=5059&navItemNumber=742>
- Bot, E. T. G., & Ceyhan, O. (2011). *Blade Optimization Tool User Manual*. Energy Research Centre of the Netherlands Publication (Vol. 09). Petten. Diambil dari <https://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-E--09-092>
- Bottasso, C. L., Campagnolo, F., & Petrović, V. (2014). Wind Tunnel Testing of Scaled Wind Turbine Models: Beyond Aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 127, 11–28. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.01.009>
- Fazlizan, A., Chong, W. T., Omar, W. Z. W., Mansor, S., Zain, Z. M., Pan, K. C., & Oon, C. S. (2012). Wind tunnel testing of 5-bladed H-rotor wind turbine with the integration of the omni-direction-guide-vane. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1440, hal. 507–512). Melaka: AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4704256>
- Fluent Inc. (2001). *Fluent 6.0 User's Guide Vol. 2*. In *Fluent 6.0 User's Guide* (1 ed., hal. 324). Lebanon: Fluent Inc.
- Hernandez, J., & Crespo, A. (1987). Aerodynamic Calculation of the Performance of Horizontal Axis Wind Turbines and Comparison with Experimental Results. *Wind Engineering*, 11(4), 11. Diambil dari <https://www.jstor.org/stable/43749310>



- Ikaningsih, M. A., & Saefudin, D. B. (2018). Pemodelan Kekuatan Bilah Turbin Angin Horisontal Multimaterial. *Jurnal Teknik*, 17(01), 27–35. Diambil dari <http://jurnalteknik.unjani.ac.id/index.php/jt/article/view/67/15>
- KataData. (2017). Berapa Target Bauran Energi Terbarukan Indonesia 2050? Diambil 19 Desember 2017, dari <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2017/09/13/berapa-target-bauran-energi-terbarukan-indonesia-2050>
- Kuester, M. S., Brown, K., Meyers, T., Intaratep, N., Borgoltz, A., & Devenport, W. J. (2015). Wind Tunnel Testing of Airfoils for Wind Turbine Applications. *Wind Engineering*, 39(6), 651–660. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.39.6.651>
- Lentera Bumi Nusantara. (2015). Lentera Angin Nusantara. Diambil 19 Desember 2017, dari <http://www.lenterabumi.com/lenteraangin.html>
- Manwel, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind Energy Explained - Theory, Design and Application* (2nd ed.). West Sussex: John Wiley and Sons Ltd.
- Marten, D. (2015). *QBlade Guidelines - v0.9*. Berlin: TU Berlin. Diambil dari [https://sourceforge.net/projects/qblade/files/Guidelines/QBlade\\_Guidelines\\_v09.pdf/download](https://sourceforge.net/projects/qblade/files/Guidelines/QBlade_Guidelines_v09.pdf/download)
- Marten, D., & Wendler, J. (2013a). *QBlade Guidelines - v0.6*. Berlin: TU Berlin. Diambil dari [http://qblade.org/project\\_images/files/guidelines\\_v06\(1\).pdf](http://qblade.org/project_images/files/guidelines_v06(1).pdf)
- Marten, D., & Wendler, J. (2013b). *QBlade Short Manual - v0.8*. Berlin: TU Berlin. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4015.0241>
- Mituleț, L.-A., Oprina, G., Chihaia, R.-A., Nicolaie, S., Nedelcu, A., & Popescu, M. (2015). Wind Tunnel Testing for A New Experimental Model of Counter-Rotating Wind Turbine. *Procedia Engineering*, 100, 1141–1149. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.477>
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., & Rothmayer, A. P. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (7th ed.). New Jersey: John Wiley and Sons Ltd.
- Pyper, J. (2016). 7 Charts That Show Wind Power Is Surging in the US and Abroad. Diambil 19 Desember 2017, dari <https://www.greentechmedia.com/articles/read/7-charts-that-show-wind-power-is-surging-in-the-us-and-abroad#gs.WQm3dSg>
- Scungio, M., Arpino, F., Focanti, V., Profili, M., & Rotondi, M. (2016). Wind Tunnel Testing of Scaled Models of A Newly Developed Darrieus-Style Vertical Axis Wind Turbine with Auxiliary Straight Blades. *Energy Conversion and Management*, 130, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.033>
- Shen, W. Z., Zhu, W. J., & Sørensen, J. N. (2014). Study of tip loss corrections using CFD rotor computations. *Journal of Physics: Conference Series*, 555(1), 12094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/555/1/012094>
- Simanjuntak, P. A. (2015). *Blade Taperless 1 m*. Tasikmalaya.
- Simorangkir, E. (2017). Bisakah RI Kejar Target Energi Terbarukan 23% di 2025? Diambil 19 Desember 2017, dari <https://finance.detik.com/energi/3643625/bisakah-ri-kejar-target-energi-terbarukan-23-di-2025>