

Studi Komparatif Turbin Angin Berdaya Sama dengan Kurva Daya yang Berbeda Berbasis Distribusi Weibull

Yandri^{1,2*}, Kho Hie Khwee¹, Rudi Kurnianto¹

¹Teknik Elektro, Universitas Tanjungpura, Pontianak

²Teknik Mesin, Universitas Tanjungpura, Pontianak

*yandri.hasan@ee.untan.ac.id

Abstrak— Pembangkit Listrik Tenaga Angin merupakan pembangkit yang mengubah energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan besarnya energi *output* dua turbin angin yang memiliki daya nominal yang sama namun dengan merk dan kurva daya yang berbeda. Obyek penelitian tempat pemasangan turbin angin berlokasi di Kota Pontianak dan sekitarnya. Data sekunder kecepatan angin diambil dari data hasil pengukuran Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Supadio Pontianak selama setahun (1 Januari – 31 Desember 2022), sedangkan untuk turbin anginnya mengambil sampel turbin angin berporos datar (*Horizontal Axis Wind Turbine / HAWT*) merek A dan merek B, dimana masing-masing memiliki daya nominal 1 kW dengan jumlah sudu sebanyak 3 buah. Fungsi kerapatan probabilitas Weibull digunakan untuk menentukan besarnya probabilitas tiap-tiap kecepatan angin selama setahun. Berdasarkan nilai probabilitas ini disertai dengan kurva daya turbin angin maka besarnya energi *output* (energi listrik) yang dihasilkan oleh turbin angin selama setahun dapat dihitung. Dari hasil olahan data pengukuran kecepatan angin di BMKG Supadio Pontianak dimana Anemometer dipasang pada ketinggian 10 m di atas permukaan tanah, besarnya kecepatan angin rata-rata selama setahun adalah 3,7160 knot atau 1,9115 m/s. Pemasangan turbin angin A dan B pada ketinggian tersebut akan menghasilkan energi listrik berturut-turut sebesar 159,10 kWh/tahun dan 145,93 kWh/tahun. Dengan demikian energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin A lebih besar dibandingkan turbin angin B.

Kata Kunci— Daya Nominal, Energi Output, Kurva Daya, Probabilitas Weibull, Turbin Angin

DOI: 10.22441/jte.2024.v15i1.007

I. PENDAHULUAN

Sistem energi dunia sedang dalam proses peralihan dari sistem energi berbasis fosil ke sistem energi berbasis sumber daya terbarukan/energi terbarukan (*renewable energy*) [1]. Sebagian besar energi yang digunakan sekarang berasal dari fosil dimana tidak bisa diperbaharui, dengan demikian manusia dituntut untuk mencari sumber-sumber energi lain yang sedapat mungkin sumber energi tersebut dapat diperbaharui atau terbarukan [2].

Pada dasarnya, inisiatif untuk mengembangkan Energi Baru dan Terbarukan (EBT) telah ada sejak dulu namun memang pemanfaatan dan pengembangannya yang belum maksimal. Setidaknya hingga saat ini, pemanfaatan EBT baru mencapai

sekitar 2% dari total potensi EBT yang ada. Terdapat beberapa kendala penyebab rendahnya pemanfaatan dan pengembangan EBT. Menghadapi hal ini, Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) mengamanatkan untuk mengoptimalkan pengembangan EBT ke depannya. Setidaknya rencana pengembangan EBT ke depannya adalah paling sedikit 23% dari total bauran energi primer pada tahun 2025 dan paling sedikit 31% dari total bauran energi primer pada tahun 2050. Terdapat berbagai sumber EBT yang telah diatur dalam Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 tentang RUEN dimana kedepannya diharapkan dapat dikembangkan di Indonesia, diantaranya adalah panas bumi, tenaga air, minihidro dan mikrohidro, bioenergi, tenaga surya, bayu atau angin, serta arus, gelombang, dan perbedaan suhu lapisan laut [3].

Angin merupakan salah satu energi yang dapat dimanfaatkan melalui konversi ke listrik ataupun mekanik. Perubahan menjadi energi listrik dengan proses perubahan energi angin tersebut menjadi putaran mekanik dan selanjutnya memutar generator merupakan contoh pemakaian yang banyak digunakan. Sedangkan dalam bentuk mekanik, pemakaian yang potensial adalah pemompaan mekanik dengan menggunakan pompa piston. Kedua proses perubahan ini disebut konversi energi angin, sedangkan sistem atau alat yang melakukannya disebut sistem konversi energi angin, selanjutnya untuk menghasilkan listrik disebut turbin angin dan untuk mekanik disebut kincir angin [4].

Banyak istilah yang digunakan untuk menamakan “turbin angin”, seperti “generator yang digerakkan angin”, “generator angin”, “generator turbin angin”, dan “sistem konversi energi angin”. Pada tulisan ini penamaan turbin angin sudah dianggap cukup, sekalipun komponen-komponen sistem pembangkit (seperti menara, generator, dan lain-lain) pada dasarnya bukan merupakan bagian dari turbin [5].

Dalam pemanfaatannya, diperlukan data mengenai potensi energi angin aktual yang tersedia di lokasi pemasangan. Kondisi topografi di suatu daerah sangat menentukan kontur atau distribusi kecepatan angin di daerah tersebut, dan dengan demikian juga akan mempengaruhi potensi yang tersedia [4].

Kecepatan angin sifatnya berfluktuasi setiap saat sehingga untuk memperoleh jumlah energi yang dikandung oleh angin perlu pengolahan data kecepatan angin yang dilakukan dengan menggunakan pengetahuan statistik. Dengan demikian,

pengolahan data bertujuan untuk memudahkan penentuan jumlah energi untuk dimanfaatkan pada suatu lokasi [6]. Proses penaksiran potensi angin di suatu daerah dapat dilakukan minimal selama satu tahun [4], [6].

Energi yang terkandung pada angin di suatu lokasi tertentu dapat dinyatakan dengan distribusi frekuensi. Distribusi Weibull sering digunakan sebagai pendekatan distribusi kecepatan angin dan merupakan analisis statistik yang paling cocok dengan data eksperimental [6]. Untuk menganalisis kondisi angin dari suatu lokasi / daerah angin (*wind regime*) dengan menggunakan distribusi Weibull, maka harus diestimasi terlebih dahulu parameter bentuk (k) dan parameter skala (c). Metode-metode yang umum digunakan untuk menentukan nilai k dan c adalah Metode Grafik (*Graphical Method*), Metode Simpangan Baku / Metode Deviasi Standar (*Standard Deviation Method*), Metode Momen (*Moment Method*), Metode Kemungkinan Maksimum (*Maximum Likelihood Method*), dan Metode Faktor Pola Energi (*Energy Pattern Factor Method*) [7]. Apabila kedua parameter telah diketahui maka fungsi kerapatan probabilitas Weibull dapat ditentukan dan melalui fungsi ini disertai kurva daya turbin angin maka dapat dihitung besarnya energi output (energi listrik) yang dihasilkan oleh turbin angin.

Di pasaran tentunya banyak tersedia tipe dan merek turbin angin dengan daya nominal yang sama namun berbeda karakteristik operasinya. Salah satu faktor penentu yang mempengaruhi kinerja turbin angin adalah responsnya terhadap kecepatan angin yang berbeda-beda dan biasanya disajikan dalam bentuk kurva daya turbin angin. Kurva daya turbin angin merupakan grafik yang menunjukkan seberapa besar keluaran daya listrik turbin pada kecepatan angin yang berbeda-beda [8]. Seorang perencana hendaknya bijaksana dalam memilih turbin angin yang optimal agar produksi energi yang diperoleh dapat semaksimal mungkin.

II. PENELITIAN TERKAIT

Saint-Drenan, Y et al [9] melakukan penelitian terkait pemodelan parametrik kurva daya turbin angin dengan melibatkan aspek lingkungan. Kurva daya turbin angin memberikan hubungan antara daya output dan kecepatan angin. Bentuk kurva daya masing-masing model turbin dapat sangat bervariasi satu sama lain. Hal ini disebabkan oleh fitur teknis turbin (kerapatan daya, *cut-in speed*, *cut-out speed*, batasan kecepatan putar, dan efisiensi aerodinamis), dan faktor lingkungan (intensitas turbulensi, kerapatan udara, geseran angin, dan belokan angin). Data mengenai kurva daya individual seringkali merupakan hak milik dan hanya tersedia melalui database komersial. Oleh karena itu pada penelitian ini dikembangkan model sumber terbuka untuk turbin angin sumbu horizontal dengan pengaturan *pitch* yang dapat menghasilkan kurva daya turbin apa pun, disesuaikan dengan kondisi spesifik di lokasi mana pun. Dari model yang disajikan selanjutnya dilakukan validasi terhadap kurva daya pabrikan dari 91 model turbin.

Mukhtar M. Salah et al [10] melakukan penelitian terkait potensi sumber daya angin di wilayah Arab Saudi. Data angin yang digunakan bersumber dari 12 stasiun meteorologi di Kerajaan Arab Saudi (KSA) untuk menyelidiki potensi pembangkit listrik tenaga angin di berbagai lokasi. Kecepatan

angin rata-rata di beberapa lokasi di bagian utara, tengah dan selatan KSA pada ketinggian 10 m dan 100 m telah digunakan untuk menghitung parameter Weibull, memplot distribusi frekuensi angin di wilayah tersebut, dan menghitung kerapatan daya. Kecepatan angin yang diukur pada 10 m digunakan untuk menghitung kecepatan angin pada ketinggian lainnya secara numerik. Metode Momen (*Moment Method*), Metode Kuadrat Terkecil (*Least Square Method*), dan Metode Kemungkinan Maksimum (*Maximum Likelihood Method*) digunakan untuk mendapatkan parameter distribusi angin Weibull. Kerapatan daya untuk semua lokasi kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan daya angin standar. Selain itu juga dihitung rata-rata energi angin bulanan dan tahunan untuk menilai kesesuaian setiap lokasi untuk pemasangan berbagai jenis turbin angin.

M. Sriti [11] melakukan penelitian terkait potensi energi angin di wilayah pesisir Maroko, analisis menggunakan data kecepatan angin berdasarkan kecepatan angin per jam dan rentang arah angin selama periode 2015-2018. Fungsi probabilitas Weibull secara luas digunakan untuk memprediksi potensi energi angin. Pada metode ini parameter bentuk dan skala dihitung menggunakan Metode Kemungkinan Maksimum (*Maximum Likelihood*), Kemungkinan Maksimum yang Dimodifikasi (*Modified Maximum Likelihood*), Faktor Pola Energi (*Energy Pattern Factor*) dan metode WASP. Kerapatan daya dan energi bulanan serta tahunan di berbagai ketinggian hub diestimasi dengan menggunakan parameter Weibull yang diekstrapolasi. Uji statistik yang berbeda digunakan untuk menentukan metode yang paling tepat dalam menyesuaikan parameter Weibull. Selain itu juga diperkenalkan persamaan baru dari parameter bentuk dan skala Weibull berbasis regresi linier dan polinomial untuk menghitung parameter ini pada kecepatan angin yang berbeda dan pada berbagai ketinggian hub. Lima turbin angin dengan daya nominal 100 kW hingga 1000 kW diuji untuk mengevaluasi kinerja energi angin di setiap lokasi, model turbin angin yang paling sesuai dipilih berdasarkan energi output dan nilai faktor kapasitas tahunan yang tinggi.

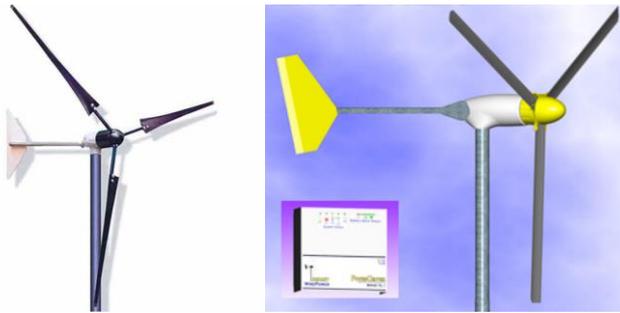
III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Penelitian mengambil tempat di Kota Pontianak dan sekitarnya.

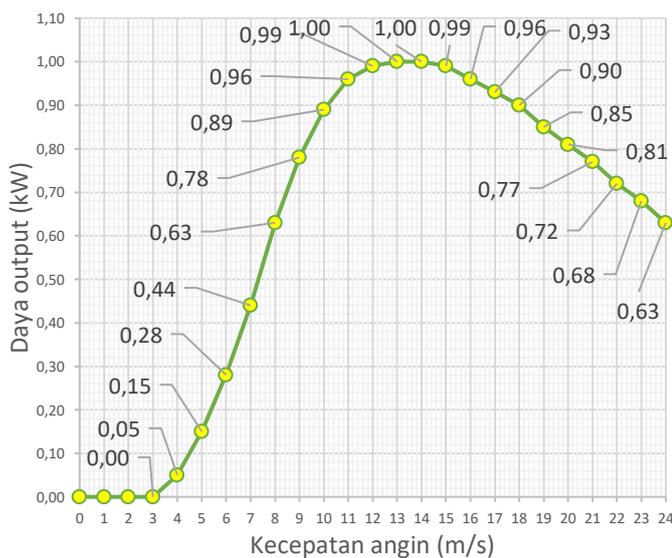
B. Bahan Penelitian

Bahan yang diambil dalam penelitian ini berupa data sekunder kecepatan angin selama setahun (1 Jan – 31 Des 2022) yang diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Supadio Pontianak. Sedangkan untuk turbin angin yang diteliti adalah turbin angin jenis sumbu horizontal sebanyak 2 (dua) sampel dengan daya yang sama sebesar 1 kW namun dengan merk yang berbeda, dengan demikian masing-masing turbin angin memiliki kurva daya (*power curve*) yang berbeda. Sampel turbin angin A dan B diperlihatkan pada gambar 1.

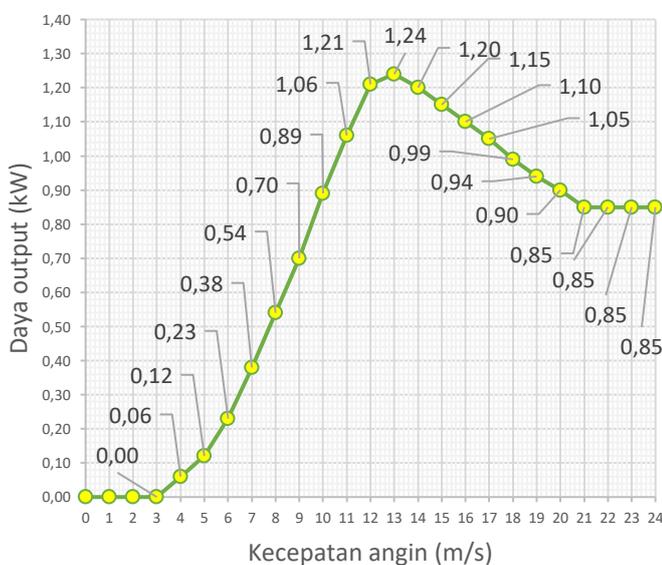


Gambar 1. Turbin angin A (kiri) dan B (kanan)

Adapun gambar 2 dan 3 berturut-turut memperlihatkan kurva daya turbin angin A dan B.



Gambar 2. Kurva Daya Turbin Angin A



Gambar 3. Kurva Daya Turbin Angin B

C. Alat Penelitian

Berupa peralatan *Automatic Weather Station* (AWS) dimana data yang terekam berupa data kelembaban, tekanan udara, curah hujan, suhu, radiasi matahari, serta kecepatan dan arah angin.

Dalam penelitian ini data yang digunakan berupa data kecepatan angin yang diukur dengan menggunakan Anemometer. Anemometer ini merupakan bagian dari peralatan AWS dan Anemometer yang dijadikan rujukan penelitian adalah Anemometer yang ada di BMKG Supadio Pontianak dimana dipasang pada ketinggian 10 meter di atas permukaan tanah.

D. Metode Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

Studi literatur

Mempelajari jurnal dan buku-buku yang berhubungan dengan Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLT-Angin) terutama menyangkut tentang statistik/distribusi Weibull dan persamaan untuk menentukan kecepatan angin rata-rata, parameter Weibull baik parameter skala maupun parameter bentuk, fungsi kerapatan probabilitas Weibull, kurva daya turbin angin, serta energi *output* turbin angin selama setahun.

Kecepatan angin rata-rata dari suatu frekuensi tertentu dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [6]:

$$\bar{v} = \frac{t_1 v_1 + t_2 v_2 + \dots + t_n v_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i v_i}{t_i} \quad (1)$$

dimana :

t_i = jumlah jam kecepatan angin ke i

v_i = kecepatan angin ke i (knot atau m/s)

Pada distribusi Weibull, variasi kecepatan angin dikelompokkan menjadi dua fungsi, yakni fungsi kerapatan probabilitas (*probability density function*) dan fungsi distribusi kumulatif (*cumulative distribution function*) / distribusi frekuensi.

Fungsi kerapatan probabilitas Weibull [$f(v)$] menyatakan fraksi waktu (atau probabilitas) dimana angin bertiup pada kecepatan v , yang dirumuskan sebagai [5], [7], [12]:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

Sedangkan fungsi distribusi kumulatif / distribusi frekuensi Weibull [$F(v)$] menyatakan fraksi waktu (atau probabilitas) dimana kecepatan angin memiliki nilai yang sama atau lebih rendah dari v . Jadi fungsi distribusi kumulatif / distribusi frekuensi Weibull [$F(v)$] diperoleh dari integrasi fungsi kerapatan probabilitas Weibull [7]. Dengan demikian,

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3)$$

Untuk menganalisis kondisi angin dari suatu lokasi / daerah angin (*wind regime*) dengan menggunakan distribusi Weibull,

maka harus diestimasi terlebih dahulu parameter bentuk (k) dan parameter skala (c).

Pada metode grafik, fungsi distribusi kumulatif Weibull ditransformasikan dalam bentuk linier dengan mengadopsi skala logaritmik. Berdasarkan pers. (3) maka distribusi kumulatif kecepatan angin dapat ditulis kembali menjadi :

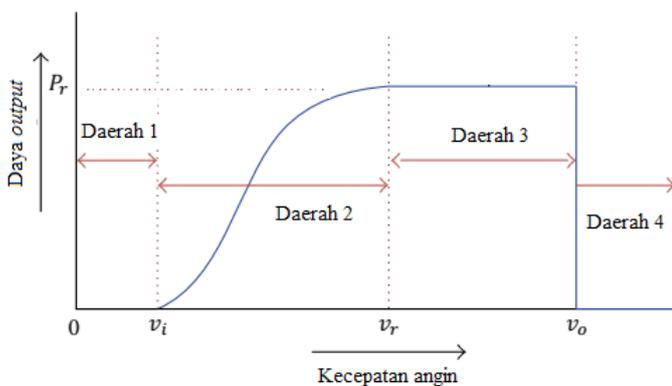
$$1 - F(v) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \tag{4}$$

Dengan melakukan proses logaritma sebanyak dua kali, maka akan diperoleh :

$$\ln \{-\ln [1 - F(v)]\} = k \ln (v) - k \ln c \tag{5}$$

Dengan memplot hubungan di atas dimana $\ln (v)$ sepanjang sumbu X dan $\ln \{-\ln [1 - F(v)]\}$ sepanjang sumbu Y , maka akan diperoleh garis lurus. Berdasarkan pers. (5) tersebut, k menghasilkan kemiringan (*slope*), sedangkan $-k \ln c$ merupakan intersep / titik potong kurva (*intercept*).

Gambar 4 menunjukkan kurva daya dari suatu turbin angin. Kurva yang disajikan bersifat teoritis dan dalam prakteknya perubahan kecepatan angin terhadap daya keluaran turbin menunjukkan pola yang tersebar.



Gambar 4. Kurva Daya Turbin Angin [8]

Karakteristik kecepatan yang penting pada turbin angin adalah kecepatan *cut-in* (*cut-in speed / cut-in velocity*, v_i), kecepatan nominal (*rated speed*, v_r), dan kecepatan *cut-out* (*cut-out speed*, v_o). Secara lengkapnya parameter kecepatan pada kurva daya dari suatu turbin angin adalah sebagai berikut [4] :

- a) *Kecepatan asut (starting speed)*
Adalah kecepatan angin minimal yang diperlukan agar sebuah turbin angin mulai berputar.
- b) *Kecepatan cut-in (cut-in speed)*
Adalah kecepatan angin minimal yang diperlukan agar sebuah turbin angin mulai menghasilkan listrik. Nilai kecepatan ini berkisar antara 2 – 5 m/s.
- c) *Kecepatan nominal (rated speed)*
Adalah kecepatan angin yang diperlukan agar sebuah turbin angin mencapai daya rencana (juga sering disebut daya nominal). Mulai kecepatan ini daya yang dihasilkan pada berbagai kecepatan sebelum mencapai *cut-in* adalah konstan. Kecepatan rencana sebuah turbin angin adalah kecepatan angin dimana turbin tersebut menghasilkan daya terpasang, yakni yang tertera pada data teknis, nilai kecepatan ini bervariasi antara 9 – 15 m/s.

- d) *Kecepatan cut-out (cut-out speed)*
Adalah kecepatan angin yang mengakibatkan turbin angin berhenti menghasilkan daya dan hal ini biasanya dihasilkan oleh pengontrolan terhadap turbin angin tersebut.
- e) *Kecepatan maksimum (furling speed)*
Adalah kecepatan angin dimana sebuah turbin angin mampu menahan beban aerodinamis agar turbin tersebut tidak rusak.

Pada gambar 4 memperlihatkan daerah kerja turbin angin dimana daya yang dihasilkan oleh sistem secara efektif berasal dari daerah 2 (v_i hingga v_r) dan daerah 3 (v_r hingga v_o). Secara lengkapnya ditunjukkan pada tabel 1 [7].

Tabel 1. Daerah Kerja Turbin Angin

Rentang kecepatan	Keterangan
0 hingga v_i	Tidak ada daya yang dihasilkan (<i>idle system</i>)
v_i hingga v_r	Daya meningkat akibat meningkatnya kecepatan angin
v_r hingga v_o	Daya yang dihasilkan konstan (daya nominal, P_r)
Lebih besar	Tidak ada daya yang dihasilkan karena sistem dalam kondisi <i>shutdown</i>

Energi *output* yang dihasilkan oleh turbin angin selama setahun dirumuskan sebagai berikut [5], [7] :

$$E_{out} = T \sum_{v=v_i}^{v=v_o} P(v) f(v) \tag{6}$$

Dengan mensubstitusikan pers. (2) ke pers. (6), maka :

$$E_{out} = T \sum_{v=v_i}^{v=v_o} P(v) \left[\frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \right] \tag{7}$$

dimana :

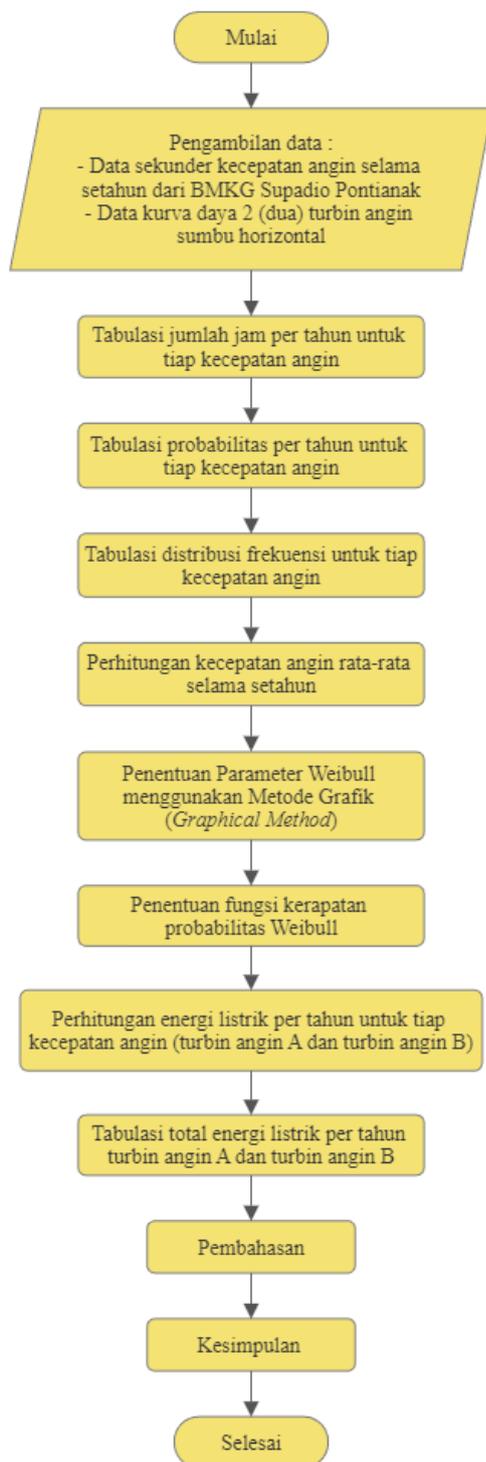
- E_{out} = energi *output* turbin angin selama setahun (kWh)
- T = jumlah jam kecepatan angin selama setahun (h)
- $P(v)$ = daya *output* turbin angin pada kecepatan angin v (kW)
- $f(v)$ = fungsi kerapatan probabilitas Weibull pada kecepatan angin v
- k = parameter bentuk
- c = parameter skala

Pengolahan data, perhitungan, dan pembahasan

Berdasarkan data sekunder kecepatan angin dari BMKG Supadio Pontianak kemudian dilakukan pengolahan data untuk mendapatkan probabilitas dan distribusi frekuensi / distribusi kumulatif kecepatan angin. Dari distribusi frekuensi kecepatan angin lalu dihitung kecepatan angin rata-rata dan besarnya nilai parameter Weibull, yakni parameter bentuk (k) dan parameter skala (c). Penentuan parameter ini dilakukan dengan menggunakan Metode Grafik (*Graphical Method*). Dari dua nilai parameter ini maka dapat ditentukan fungsi kerapatan probabilitas Weibull [$f(v)$], kemudian dihitung besarnya

probabilitas untuk tiap kecepatan angin dan jumlah jam kecepatan angin tersebut dalam satu tahun. Selanjutnya dari kurva daya tiap turbin angin maka dapat ditentukan besarnya energi *output* (energi listrik) untuk tiap kecepatan angin serta energi total selama setahun. Langkah akhir adalah membahas perbandingan energi per tahun yang diperoleh oleh tiap turbin angin.

Diagram alir penelitian



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

IV. HASIL DAN ANALISIS

A. Probabilitas dan Distribusi Frekuensi Kecepatan Angin

Tabel 2 merupakan hasil olahan data pengukuran kecepatan angin BMKG Supadio Pontianak selama setahun.

Tabel 2. Data Olahan Hasil Pengukuran di BMKG Supadio Pontianak (1 Januari – 31 Desember 2022)

Kecepatan angin (knot)	Jumlah jam per tahun	Kecepatan angin (knot)	Jumlah jam per tahun
0	1713	15	18
1	10	16	7
2	575	17	4
3	2512	18	3
4	1380	19	3
5	857	20	2
6	533	21	0
7	283	22	0
8	330	23	0
9	126	24	0
10	186	25	0
11	68	26	0
12	101	27	0
13	24	28	0
14	24	29	1
	$\sum t_{i_1} = 8722$		$\sum t_{i_2} = 38$
Jumlah (jam)	$\sum t_i = \sum t_{i_1} + \sum t_{i_2} = 8760$		

Sedangkan tabel 3 memperlihatkan probabilitas per tahun kecepatan angin.

Tabel 3. Probabilitas per Tahun Kecepatan Angin

Kecepatan angin (knot)	Probabilitas per tahun	Kecepatan angin (knot)	Probabilitas per tahun
0	0,1955	15	0,0021
1	0,0011	16	0,0008
2	0,0656	17	0,0005
3	0,2868	18	0,0003
4	0,1575	19	0,0003
5	0,0978	20	0,0002
6	0,0608	21	0,0000
7	0,0323	22	0,0000
8	0,0377	23	0,0000
9	0,0144	24	0,0000
10	0,0212	25	0,0000
11	0,0078	26	0,0000
12	0,0115	27	0,0000

Kecepatan angin (knot)	Probabilitas per tahun	Kecepatan angin (knot)	Probabilitas per tahun
13	0,0027	28	0,0000
14	0,0027	29	0,0001
	$\sum p_{i_1}$		$\sum p_{i_2}$
Jumlah	$\sum p = \sum p_{i_1} + \sum p_{i_2} = 1,0000$		

Langkah selanjutnya adalah membuat distribusi frekuensi kecepatan angin seperti tampak pada tabel 4.

Tabel 4. Distribusi Frekuensi Kecepatan Angin

Kecepatan angin v (knot)	Probabilitas atau frekuensi	Distribusi kumulatif $F(v)$
0	0,1955	0,1955
1	0,0011	0,1967
2	0,0656	0,2623
3	0,2868	0,5491
4	0,1575	0,7066
5	0,0978	0,8045
6	0,0608	0,8653
7	0,0323	0,8976
8	0,0377	0,9353
9	0,0144	0,9497
10	0,0212	0,9709
11	0,0078	0,9787
12	0,0115	0,9902
13	0,0027	0,9929
14	0,0027	0,9957
15	0,0021	0,9977
16	0,0008	0,9985
17	0,0005	0,9990
18	0,0003	0,9993
19	0,0003	0,9997
20	0,0002	0,9999
21	0,0000	0,9999
22	0,0000	0,9999
23	0,0000	0,9999
24	0,0000	0,9999
25	0,0000	0,9999
26	0,0000	0,9999
27	0,0000	0,9999
28	0,0000	0,9999
29	0,0001	1,0000

B. Kecepatan Angin Rata - Rata

Berdasarkan data pada tabel 2 maka dapat dihitung hasil kali kecepatan angin dengan jumlah jam per tahun seperti tampak pada tabel 5.

Tabel 5. *Spreadsheet* Kecepatan Angin dan Jumlah Jam per Tahun pada Ketinggian 10 m di Atas Permukaan Tanah

Kecepatan angin v_i (knot)	Jumlah jam per tahun t_i	Hasil kali kecepatan angin dan jumlah jam per tahun $t_i v_i$
0	1713	0
1	10	10
2	575	1150
3	2512	7536
4	1380	5520
5	857	4285
6	533	3198
7	283	1981
8	330	2640
9	126	1134
10	186	1860
11	68	748
12	101	1212
13	24	312
14	24	336
15	18	270
16	7	112
17	4	68
18	3	54
19	3	57
20	2	40
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0
25	0	0
26	0	0
27	0	0
28	0	0
29	1	29
Jumlah	$\sum t_i = 8760$	$\sum t_i v_i = 32552$

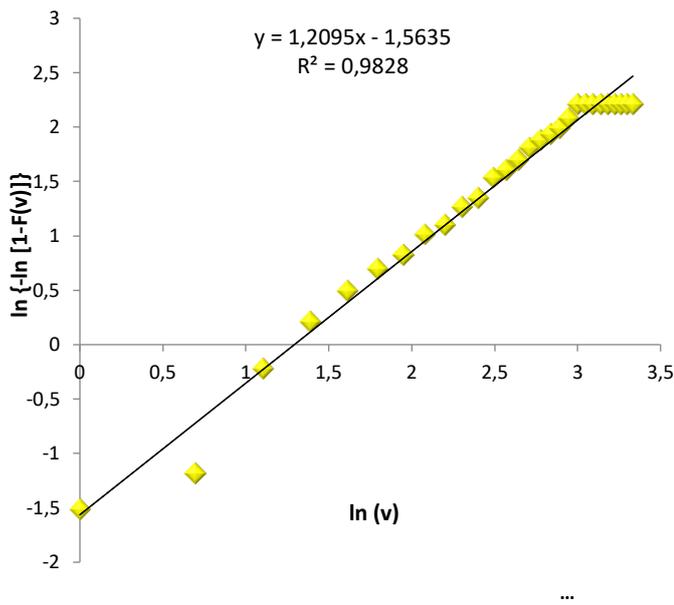
Dengan menerapkan pers. (1) maka besarnya kecepatan angin rata-rata pada ketinggian 10 m adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Kecepatan angin rata - rata, } \bar{v} &= \sum_{i=1}^n \frac{t_i v_i}{t_i} \\
 &= \frac{32552}{8760} \\
 &= 3,7160 \text{ knot}
 \end{aligned}$$

karena 1 knot = 0,5144 m/s, maka kecepatan angin rata-rata = $0,5144 \times 3,7160 = 1,9115$ m/s

C. Penentuan Parameter Weibull menggunakan Metode Grafik (*Graphical Method*)

Berdasarkan distribusi frekuensi kecepatan angin (tabel 4), maka dapat ditentukan besarnya parameter Weibull berupa parameter bentuk (k) dan parameter skala (c).



Gambar 6. Metode Grafik (*Graphical Method*) untuk Mengestimasi Parameter Weibull Berdasarkan Data Olahan Hasil Pengukuran Kecepatan Angin di BMKG Supadio Pontianak (1 Januari - 31 Desember 2022)

Dapat dilihat pada gambar 6 bahwa persamaan yang dihasilkan berdasarkan data kecepatan angin BMKG Supadio Pontianak adalah:

$$y = 1,2095x - 1,5635 \quad (8)$$

dimana koefisien determinasi (R^2) antara data dan garis pencocokan adalah sebesar 0,9828. Dengan membandingkan pers. (5) dengan pers. (8), maka besarnya k adalah 1,2095 sedangkan $k \ln c = 1,5635$ sehingga c dapat ditentukan sbb :

$$k \ln c = 1,5635$$

$$\ln c = \frac{1,5635}{k} = \frac{1,5635}{1,2095}$$

$$\ln c = 1,2927$$

$$c = e^{1,2927} = 3,6425 \text{ knot}$$

karena 1 knot = 0,5144 m/s, maka $c = 0,5144 \times 3,6425 = 1,8737 \text{ m/s}$.

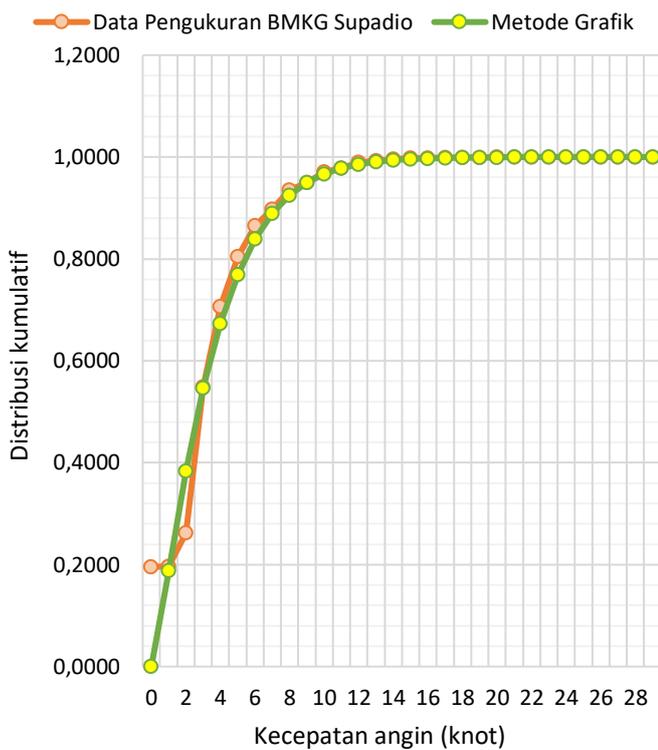
D. Perbandingan Metode Grafik dan Data Pengukuran

Berdasarkan nilai parameter bentuk (k) dan parameter skala (c) yang diperoleh dengan Metode Grafik maka dapat ditentukan besarnya distribusi kumulatif dengan menggunakan pers. (3) seperti tampak pada tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Distribusi Kumulatif antara Data Pengukuran BMKG Supadio dan Metode Grafik untuk Berbagai Kecepatan Angin

Kecepatan angin v (knot)	Distribusi kumulatif $F(v)$	
	Data pengukuran BMKG Supadio	Metode grafik
0	0,1955	0,0000
1	0,1967	0,1889
2	0,2623	0,3839
3	0,5491	0,5465
4	0,7066	0,6737
5	0,8045	0,7694
6	0,8653	0,8394
7	0,8976	0,8896
8	0,9353	0,9250
9	0,9497	0,9495
10	0,9709	0,9664
11	0,9787	0,9778
12	0,9902	0,9854
13	0,9929	0,9905
14	0,9957	0,9939
15	0,9977	0,9961
16	0,9985	0,9975
17	0,9990	0,9984
18	0,9993	0,9990
19	0,9997	0,9994
20	0,9999	0,9996
21	0,9999	0,9998
22	0,9999	0,9998
23	0,9999	0,9999
24	0,9999	0,9999
25	0,9999	1,0000
26	0,9999	1,0000
27	0,9999	1,0000
28	0,9999	1,0000
29	1,0000	1,0000

Selanjutnya gambar 7 menunjukkan grafik hubungan antara kecepatan angin dan distribusi kumulatif yang merupakan perbandingan antara data hasil pengukuran di BMKG Supadio Pontianak dengan Metode Grafik.



Gambar 7. Grafik antara Kecepatan Angin dan Distribusi Kumulatif berdasarkan Data Pengukuran Kecepatan Angin BMKG Supadio Pontianak dan Metode Grafik.

Berdasarkan gambar 7 terlihat bahwa hasil yang diperoleh dengan menggunakan Metode Grafik mendekati data hasil pengukuran kecepatan angin di BMKG Supadio Pontianak, terkecuali untuk kecepatan angin 0 knot.

E. Penentuan Energi Listrik Tahunan

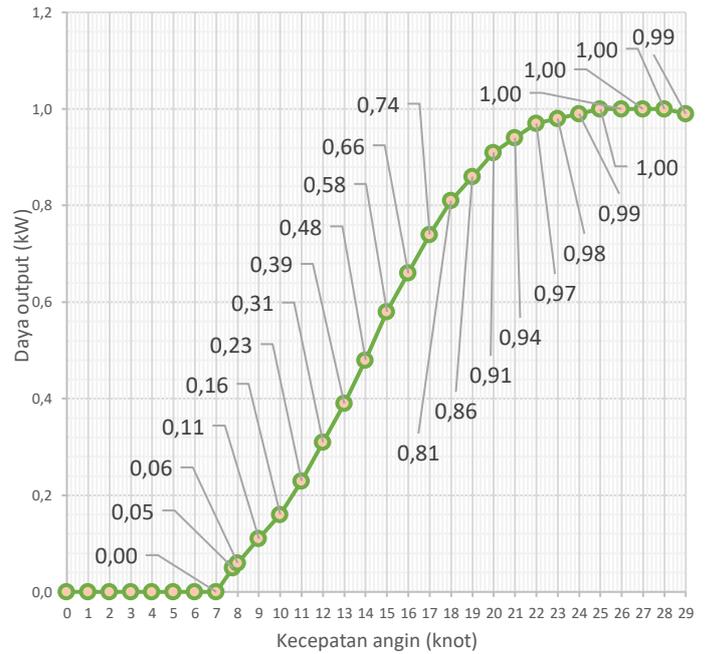
Dengan memasukkan nilai $k = 1,2095$ dan $c = 3,6425$ knot pada fungsi kerapatan probabilitas Weibull $[f(v)]$ yakni pers. (2), maka:

$$f(v) = \frac{1,2095}{3,6425} \left(\frac{v}{3,6425}\right)^{1,2095 - 1} e^{-\left(\frac{v}{3,6425}\right)^{1,2095}}$$

$$= 0,3321 (0,2745 v)^{0,2095} e^{-(0,2745 v)^{1,2095}} \quad (9)$$

Turbin Angin A

Berhubung kurva daya turbin angin pada datasheet menggambarkan kurva antara daya output turbin angin (dalam satuan kW) terhadap kecepatan angin (dalam satuan m/s), oleh karena itu untuk kecepatan anginnya akan dikonversikan dari satuan m/s menjadi knot sedangkan satuannya tetap. Salah satu perangkat lunak (*software*) yang dapat digunakan untuk mengekstrak titik-titik data dari sebuah gambar grafik adalah *Graph Grabber*, dimana hasil yang diperoleh dari *Graph Grabber v2.0* diperlihatkan pada gambar 8 dan tabel 7.



Gambar 8. Kurva Daya Turbin Angin A menggunakan *Graph Grabber v2.0*

Tabel 7. Kurva Daya Turbin Angin A

Kecepatan angin (m/s)	Daya output (kW)	Kecepatan angin (m/s)	Daya output (kW)
0	0,00	15	0,58
1	0,00	16	0,66
2	0,00	17	0,74
3	0,00	18	0,81
4	0,00	19	0,86
5	0,00	20	0,91
6	0,00	21	0,94
7	0,00	22	0,97
7,7760	0,05	23	0,98
8	0,06	24	0,99
9	0,11	25	1,00
10	0,16	26	1,00
11	0,23	27	1,00
12	0,31	28	1,00
13	0,39	29	0,99
14	0,48		

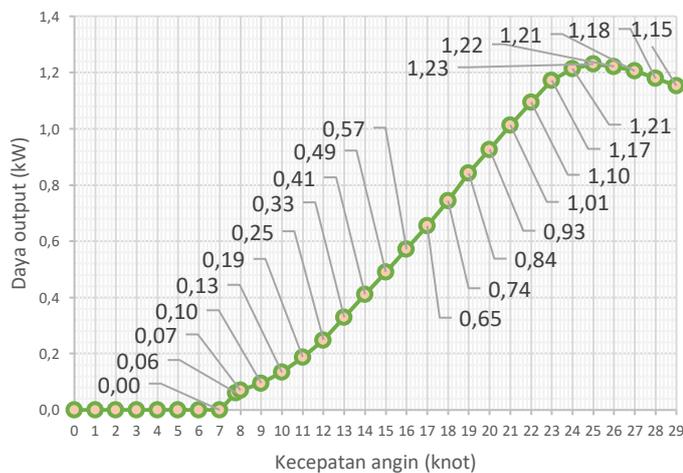
Secara lengkapnya nilai probabilitas, jumlah jam per tahun, dan energi per tahun diperlihatkan pada tabel 8.

Tabel 8. Energi Listrik per Tahun Turbin Angin A pada Ketinggian 10 meter di Atas Permukaan Tanah

Kecepatan angin		Daya (kW)	Probabilitas $f(v)$	Jumlah jam/tahun pada v	Energi (kWh/tahun)
v (knot)	v (m/s)				
0	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,00
1	0,5144	0,00	0,2055	1799,78	0,00
2	1,0288	0,00	0,1805	1581,01	0,00
3	1,5432	0,00	0,1446	1266,84	0,00
4	2,0576	0,00	0,1105	968,26	0,00
5	2,5720	0,00	0,0819	717,19	0,00
6	3,0864	0,00	0,0592	518,88	0,00
7	3,6008	0,00	0,0421	368,42	0,00
7,7760	4,0000	0,05	0,0319	279,35	13,97
8	4,1152	0,06	0,0294	257,50	15,45
9	4,2296	0,11	0,0203	177,54	19,53
10	4,3440	0,16	0,0138	120,96	19,35
11	4,4584	0,23	0,0093	81,54	18,75
12	4,5728	0,31	0,0062	54,43	16,87
13	4,6872	0,39	0,0041	36,01	14,04
14	4,8016	0,48	0,0027	23,63	11,34
15	4,9160	0,58	0,0018	15,39	8,92
16	5,0304	0,66	0,0011	9,95	6,57
17	5,1448	0,74	0,0007	6,39	4,73
18	5,2592	0,81	0,0005	4,08	3,30
19	5,3736	0,86	0,0003	2,59	2,22
20	5,4880	0,91	0,0002	1,63	1,48
21	5,6024	0,94	0,0001	1,02	0,96
22	5,7168	0,97	0,0001	0,64	0,62
23	5,8312	0,98	0,0000	0,40	0,39
24	5,9456	0,99	0,0000	0,24	0,24
25	6,0600	1,00	0,0000	0,15	0,15
26	6,1744	1,00	0,0000	0,09	0,09
27	6,2888	1,00	0,0000	0,06	0,06
28	6,4032	1,00	0,0000	0,03	0,03
29	6,5176	0,99	0,0000	0,02	0,02
				Total	159,10

Turbin Angin B

Untuk turbin angin B tampak pada gambar 9 dan tabel 9.



Gambar 9. Kurva Daya Turbin Angin B menggunakan *Graph Grabber v2.0*

Tabel 9. Kurva Daya Turbin Angin B

Kecepatan Angin (m/s)	Daya Output (kW)	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Output (kW)
0	0,00	15	0,49
1	0,00	16	0,57
2	0,00	17	0,65
3	0,00	18	0,74
4	0,00	19	0,84
5	0,00	20	0,93
6	0,00	21	1,01
7	0,00	22	1,10
7,7760	0,06	23	1,17
8	0,07	24	1,21
9	0,10	25	1,23

Kecepatan Angin (m/s)	Daya Output (kW)	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Output (kW)
10	0,13	26	1,22
11	0,19	27	1,21
12	0,25	28	1,18

Kecepatan Angin (m/s)	Daya Output (kW)	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Output (kW)
13	0,33	29	1,15
14	0,41		

Tabel 10. Energi Listrik per Tahun Turbin Angin B pada Ketinggian 10 meter di Atas Permukaan Tanah

Kecepatan angin		Daya (kW)	Probabilitas $f(v)$	Jumlah jam/tahun pada v	Energi (kWh/tahun)
v (knot)	v (m/s)				
0	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,00
1	0,5144	0,00	0,2055	1799,78	0,00
2	1,0288	0,00	0,1805	1581,01	0,00
3	1,5432	0,00	0,1446	1266,84	0,00
4	2,0576	0,00	0,1105	968,26	0,00
5	2,5720	0,00	0,0819	717,19	0,00
6	3,0864	0,00	0,0592	518,88	0,00
7	3,6008	0,00	0,0421	368,42	0,00
7,7760	4,0000	0,06	0,0319	279,35	16,76
8	4,1152	0,07	0,0294	257,50	18,02
9	4,6296	0,10	0,0203	177,54	17,75
10	5,1440	0,13	0,0138	120,96	15,73
11	5,6584	0,19	0,0093	81,54	15,49
12	6,1728	0,25	0,0062	54,43	13,61
13	6,6872	0,33	0,0041	36,01	11,88
14	7,2016	0,41	0,0027	23,63	9,69
15	7,7160	0,49	0,0018	15,39	7,54
16	8,2304	0,57	0,0011	9,95	5,67
17	8,7448	0,65	0,0007	6,39	4,15
18	9,2592	0,74	0,0005	4,08	3,02
19	9,7736	0,84	0,0003	2,59	2,17
20	10,2880	0,93	0,0002	1,63	1,52
21	10,8024	1,01	0,0001	1,02	1,03
22	11,3168	1,10	0,0001	0,64	0,70
23	11,8312	1,17	0,0000	0,40	0,46
24	12,3456	1,21	0,0000	0,24	0,30
25	12,8600	1,23	0,0000	0,15	0,18
26	13,3744	1,22	0,0000	0,09	0,11
27	13,8888	1,21	0,0000	0,06	0,07
28	14,4032	1,18	0,0000	0,03	0,04
29	14,9176	1,15	0,0000	0,02	0,02
				Total	145,93

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada sub bab IV. B, besarnya kecepatan angin rata-rata selama setahun (1 Januari – 31 Desember 2022) dengan merujuk pada data BMKG Supadio Pontianak (ketinggian pengukuran 10 m di atas permukaan tanah) adalah 3,7160 knot atau 1,9115 m/s. Pada ketinggian 10 m ini besarnya energi yang dihasilkan oleh turbin angin A dan B berturut-turut adalah 159,10 kWh/tahun dan 145,93 kWh/tahun (tabel 8 dan 10). Dengan demikian turbin angin A menghasilkan energi listrik yang lebih besar dibandingkan turbin angin B dengan selisih energi sebesar 13,17 kWh/tahun.

V. KESIMPULAN

Penelitian telah dilakukan dengan mengambil 2 (dua) sampel turbin angin dengan merek A dan merek B dimana masing-masing turbin angin memiliki daya nominal yang sama sebesar 1 kW namun dengan kurva daya yang berbeda. Berdasarkan data sekunder hasil pengukuran kecepatan angin di BMKG Supadio Pontianak (1 Januari – 31 Desember 2022) dimana Anemometer dipasang pada ketinggian 10 m di atas permukaan tanah, pemasangan turbin angin di lokasi tersebut lebih direkomendasikan untuk menggunakan turbin angin A dibandingkan turbin angin B.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak BMKG Supadio Pontianak atas kerjasamanya dalam memberikan data sekunder kecepatan angin selama setahun. Ucapan terima kasih juga penulis haturkan kepada tim editorial Jurnal Teknologi Elektro atas dipublikasikannya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Apriliyanti and D. Rizki, 'Kebijakan Energi Terbarukan: Studi Kasus Indonesia Dan Norwegia Dalam Pengelolaan Sumber Energi Berkelanjutan', *Jurnal Ilmu Pemerintahan Widya Praja*, vol. 49, no. 2, pp. 186–209, 2023.
- [2] R. Permadi and A. I. Agung, 'Rancang Bangun Hybrid Energy Solar Cell Dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Berbasis Microcontroller', *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 9, no. 1, 2020.
- [3] G. A. Widyarningsih, 'Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional', *Jurnal Hukum Lingkungan Indonesia*, vol. 4, no. 1, pp. 139–152, 2017.
- [4] D. Daryanto, 'Energi: Masalah dan Pemanfaatannya Bagi Kehidupan Manusia'. Jakarta: Pustaka Widyatama, 2007.
- [5] G. M. Masters, *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons, 2013.
- [6] S. Himran, 'Energi Angin', *CV Bintang Lamumpatue, Makassar*, vol. 50, pp. 100–150, 2005.
- [7] S. Mathew, *Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics*, vol. 1. Springer, 2006.
- [8] Sohoni, S. C. Gupta, and R. K. Nema, 'A critical review on wind turbine power curve modelling techniques and their applications in wind based energy systems', *Journal of Energy*, vol. 2016, 2016.
- [9] Y.-M. Saint-Drenan *et al.*, 'A parametric model for wind turbine power curves incorporating environmental conditions', *Renew Energy*, vol. 157, pp. 754–768, 2020.
- [10] M. M. Salah, A. G. Abo-khalil, and R. P. Praveen, 'Wind speed characteristics and energy potential for selected sites in Saudi Arabia', *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 33, no. 2, pp. 119–128, 2021.
- [11] M. Sriti, 'Performance evaluation of wind turbines for energy production in Morocco's coastal regions', *Results in Engineering*, vol. 10, p. 100215, 2021.
- [12] G. D. Price, *Renewable Power and Energy, Volume II: Wind and Thermal Systems*. Momentum Press, 2018.
- [13] H. Bidaoui, I. El Abbassi, A. El Bouardi, and A. Darcherif, 'Wind speed data analysis using Weibull and Rayleigh distribution functions, case study: five cities northern Morocco', *Procedia Manuf*, vol. 32, pp. 786–793, 2019.
- [14] F. H. Mahmood, A. K. Resen, and A. B. Khamees, 'Wind characteristic analysis based on Weibull distribution of Al-Salman site, Iraq', *Energy reports*, vol. 6, pp. 79–87, 2020.
- [15] H. Mohamadi, A. Saeedi, Z. Firoozi, S. S. Zangabadi, and S. Veisi, 'Assessment of wind energy potential and economic evaluation of four wind turbine models for the east of Iran', *Heliyon*, vol. 7, no. 6, 2021.
- [16] K. Azad, M. Rasul, P. Halder, and J. Sutariya, 'Assessment of wind energy prospect by Weibull distribution for prospective wind sites in Australia', *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 348–355, 2019.