

KAJIAN POTENSI ENERGI ANGIN DI PERAIRAN BARAT DAN SELATAN PULAU SULAWESI

Syerly Klara, Abd Latief Had, Baharuddin & M. Uswah Pawara

Jurusan Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Jl. Perintis Kemerdekaan Km.10 Tamalanrea – Makassar, 90245

Telp/Fax: (0411) 585637

e-mail: elikapal@yahoo.com

Abstrak

Umumnya telah diketahui bahwa Indonesia mempunyai cadangan energi terbarukan yang besar bersumber dari matahari, angin, air, biomassa, dan lain-lain. Namun sumber daya yang ada ini belum dieksplorasi dan digunakan secara efektif dan maksimal. Salah satu sumber daya yang hampir belum digunakan sama sekali di Indonesia adalah energi angin terutama energi angin di laut. Seperti yang diketahui bahwa Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki wilayah laut yang luas sehingga potensi energi angin di wilayah perairan Indonesia juga melimpah. Oleh karena itu, menjadi sangat penting untuk mengkaji densitas energi angin di wilayah-wilayah perairan Indonesia untuk dapat menentukan lokasi terbaik dalam memperoleh energi angin secara maksimal. Pada penelitian ini, data kecepatan angin yang diperlukan untuk penentuan densitas angin diperoleh dari stasiun meteorologi Paotere, Makassar. Stasiun meteorologi tersebut mengukur dan mengumpulkan data dari 11 wilayah perairan di bagian barat dan selatan Pulau Sulawesi. Dalam analisis, distribusi Weibull dan Rayleigh digunakan untuk menghitung probability density function (PDF) and cumulative distribution function (CDF). Namun demikian, untuk mendapatkan fungsi-fungsi distribusi tersebut, faktor bentuk (k) dan faktor skala (c) dari distribusi Weibull dan Rayleigh harus ditentukan sebelumnya. Berdasarkan hasil perhitungan dalam penelitian ini, dapat dikatakan bahwa wilayah perairan barat dan selatan pulau Sulawesi memiliki densitas energi angin yang memadai untuk dapat dieksplorasi dan dimanfaatkan lebih lanjut.

Kata Kunci: distribusi Weibull, regresi linier, probability density function, cumulative distribution function, densitas energi angin

PENDAHULUAN

Penyediaan energi di masa depan merupakan permasalahan yang senantiasa menjadi perhatian semua Negara, karena bagaimanapun juga kesejahteraan manusia dalam kehidupan modern sangat terkait dengan jumlah dan mutu energi yang tersedia. Bagi suatu negara khususnya negara berkembang seperti Indonesia, penyediaan energi merupakan faktor yang sangat penting dalam mendorong pembangunan. Seiring dengan meningkatnya pembangunan terutama pembangunan di sektor industri ditambah dengan pertumbuhan ekonomi dan pertumbuhan penduduk, kebutuhan akan energi terus meningkat. Sampai saat ini minyak bumi masih merupakan sumber energi utama dalam memenuhi kebutuhan energi Indonesia.

Namun demikian cadangan minyak bumi Indonesia hanya cukup untuk 12 tahun ke depan (IEO, 2010). Badan Energi Internasional, IEA, menyatakan dalam laporan *World Energy Outlook 2008* bahwa harga minyak akan meningkat menjadi lebih dari 100 US \$/barrel ketika ekonomi dunia telah stabil. Pada tahun 2030 harga minyak diklaim telah meningkat di atas 200 US \$/barrel (IEA, 2008). Kesadaran akan pentingnya pelestarian lingkungan saat ini khususnya pengurangan emisi CO₂ merupakan pendorong untuk mengurangi konsumsi bahan bakar fosil. Peningkatan suhu bumi dan naiknya permukaan air laut akibat mencairnya lembaran es kutub utara dan selatan menunjukkan efek dari karbon yang terakumulasi di atmosfer.

Dengan adanya permasalahan tersebut sudah sepatutnya Pemerintah Indonesia mulai mencari dan memanfaatkan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan bisa membantu mengurangi ketergantungan akan bahan bakar fosil. Salah satu yang dipilih adalah energi angin. Energi angin yang tersedia di Indonesia ternyata belum dimanfaatkan sepenuhnya sebagai energi alternatif. Angin selama ini dipandang sebagai proses alam biasa yang kurang memiliki nilai ekonomis bagi kegiatan produktif masyarakat. Pengembangan sumber energi alternatif

angin sangat cocok di Indonesia terutama di laut, mengingat wilayah laut Indonesia cukup luas dan di laut energi angin sangat besar jumlahnya. Oleh sebab itu studi potensi angin pada lokasi yang mempunyai potensi merupakan sesuatu yang mutlak dilakukan sebelum diputuskan untuk pengembangan energi angin.

Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana distribusi dan kecepatan angin di perairan barat dan selatan Pulau Sulawesi.
2. Berapa besar energi angin yang dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik diperairan barat dan selatan Pulau Sulawesi.
3. Bagaimana potensi energi angin yang dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik diperairan barat dan selatan Pulau Sulawesi.

Pengertian Angin

Angin adalah udara yang bergerak yang diakibatkan oleh rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara disekitarnya. Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke bertekanan udara rendah.

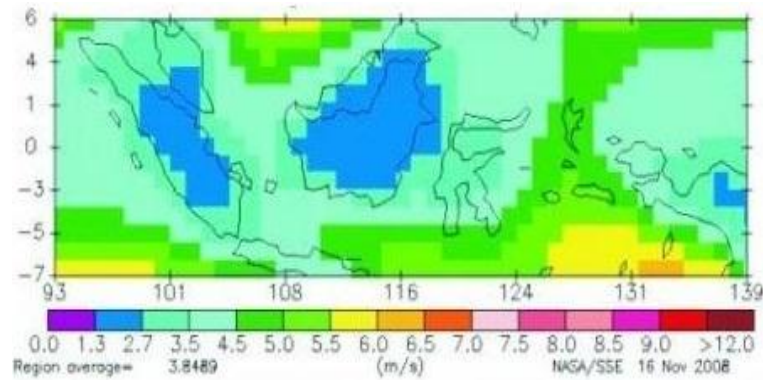
Tabel 1. Tingkat Kecepatan Angin 10 Meter Diatas Permukaan Tanah

Tingkat Kecepatan Angin 10 meter di atas permukaan Tanah		
Kelas	Kecepatan	Kondisi Alam di Daratan
1	0,00 – 0,02	-----
2	0,3 – 1,5	Angin tenang, asap lurus ke atas
3	1,6 – 3,3	Asap bergerak mengikuti arah angin
4	3,4 – 5,4	Wajah terasa ada angin, daun bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
5	5,5 – 7,9	Debu jalan, kertas beterbangan, ranting pohon bergoyang
6	8,0 – 10,7	Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar
7	10,8 – 13,8	Ranting pohon besar bergoyang, air plumpang berombak kecil
8	13,9 – 17,1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga
9	17,2 – 20,7	Dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin
10	20,8 – 24,4	Dapat mematahkan ranting pohon, rumah rubuh
11	24,5 – 28,4	Dapat merubuhkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	28,5 – 32,6	Menimbulkan kerusakan parah
13	32,7 – 36,9	Tornado

Sumber: Habibie, 2011

Potensi Energi Angin Indonesia

Berdasarkan data dari GWEC, potensi sumber angin dunia diperkirakan sebesar 50.000 Twh/tahun, sedangkan untuk Indonesia dapat kita amati pada gambar 1 yang dapat menunjukkan peta potensi energi angin di Indonesia. Perbedaan kecepatan udara terlihat dari perbedaan warnanya. Biru menyatakan kecepatan udara rendah, sedangkan hijau, kuning, merah dan sekitarnya menyatakan semakin besarnya kecepatan angin. Berdasarkan gambar 1 tampak jelas bahwa Indonesia memiliki potensi angin yang melimpah utamanya di wilayah pesisir Kawasan Timur Indonesia.



Gambar 1. Peta Potensi Kecepatan Angin di Indonesia
(sumber: <http://indonesia.wordpress.com>)

Kecepatan Angin Rata-Rata

Salah satu informasi yang paling penting pada spektrum angin yang tersedia di lokasi adalah kecepatan rata-rata. Untuk perhitungan energi angin, kecepatan angin rata-rata ditunjukkan oleh;

$$V_m = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^3 \right)^{1/3} \tag{1}$$

Jika kita menggunakan Persamaan (1), kecepatan rata-rata pada contoh sebelumnya adalah 6.94 m/s dan daya yang sesuai adalah 207 W/m². Hal ini menunjukkan bahwa hubungan kecepatan pangkat tiga, rata-rata yang terukur dinyatakan dalam Persamaan (1) harus digunakan dalam analisis energi angin.

Distribusi Kecepatan Angin

Kecepatan angin rata-rata, distribusi kecepatan dalam suatu wilayah juga merupakan faktor penting dalam analisis energi angin. Salah satu ukuran untuk variabilitas kecepatan dalam himpunan data angin adalah standar deviasi (σ_v). Standar deviasi merupakan penyimpangan kecepatan individu dari nilai rata-rata. Jika kecepatan disajikan dalam bentuk distribusi frekuensi, deviasi rata-rata dan standar yang ditunjukkan oleh;

$$V_m = \left(\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i V_i^3}{\sum_{i=1}^n f_i} \right)^{1/3} \tag{2}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i (V_i - V_m)^2}{\sum_{i=1}^n f_i}} \tag{3}$$

f_i adalah frekuensi dan V_i adalah nilai tengah dari interval yang sesuai. Sangat menarik untuk dicatat bahwa, kecepatan angin rata-rata tidak bertepatan dengan kecepatan angin yang paling sering. Umumnya, kecepatan angin rata-rata lebih tinggi dari frekuensi terbesar kecepatan angin, kecuali untuk trade wind yang relatif stabil sepanjang waktu. Kurva distribusi kumulatif dibuat dengan memplot waktu kumulatif dimana kecepatan angin berada di bawah batas atas dari interval kelas angin.

Model statistik untuk Analisis Data Angin

Berbagai fungsi probabilitas yang dilengkapi dengan data lapangan untuk mengidentifikasi distribusi statistik yang cocok untuk mewakili analisa energi angin. Hal ini ditemukan bahwa distribusi Weibull dan Rayleigh dapat digunakan untuk menggambarkan variasi angin dalam wilayah dengan tingkat akurasi yang dapat diterima (Sathyajith, 2006).

Distribusi Weibull

Dalam distribusi Weibull, variasi kecepatan angin yang ditandai dengan dua fungsi: (1) *Probability density function* dan (2) *cumulative distribution function*. *Probability density function* ($f(V)$) menunjukkan sebagian kecil dari waktu (atau probabilitas) angin dengan kecepatan tertentu V . Hal ini dirumuskan dengan;

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} \quad (4)$$

Dimana, k adalah faktor bentuk dan c adalah faktor skala. Fungsi distribusi kumulatif dari kecepatan V memberikan sebagian kecil dari waktu (atau probabilitas) bahwa kecepatan angin sama atau lebih rendah dari V . Jadi F distribusi kumulatif (V) adalah integral dari fungsi *Probability density function*. Dengan demikian,

$$F(V) = \int_0^V f(V) dV = 1 - e^{-(V/c)^k} \quad (5)$$

Rata-rata kecepatan angin di wilayah, mengikuti distribusi Weibull, dirumuskan dengan;

$$V_m = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (6)$$

Deviasi standar dari kecepatan angin, mengikuti distribusi Weibull;

$$\sigma_V = \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^{1/2} \quad (7)$$

Berdasarkan distribusi Weibull, faktor utama yang menentukan keseragaman angin adalah faktor bentuk k . Untuk menganalisis angin pada daerah potensi angin menggunakan distribusi Weibull, kita harus mengestimasi parameter Weibull k dan c (Sathyajith, 2006). Metode umum untuk menentukan k dan c adalah:

1. Linear Regression Method

Dalam *Graphical method*, mengubah fungsi distribusi kumulatif ke dalam bentuk linier, mengadopsi skala logaritmik. Persamaan untuk *cumulative distribution* kecepatan angin dapat ditulis kembali;

$$1 - F(V) = e^{-(V/c)^k} \quad (8)$$

Mengambil logaritma dua kali, kita mendapatkan;

$$\ln\{-\ln[1 - F(V)]\} = k \ln V_i - k \ln c \quad (9)$$

Jika kita menghasilkan persamaan regresi untuk garis diplot menggunakan spread sheet standar atau paket statistik dan membandingkannya dengan Persamaan (9), kita bisa mengetahui nilai-nilai k dan c .

2. Maximum likelihood method

Dari beberapa metode yang tersedia untuk menghitung nilai k dan c , salah satu metode yang paling banyak digunakan adalah metode keserupaan maksimum (*maximum likelihood method*) karena metode ini cocok untuk jumlah data yang besar dan mempunyai karakteristik yang diinginkan.

Persamaan (10) dapat diselesaikan dengan menggunakan metode iteratif standar

$$\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln v_i}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{1}{k} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln v_i = 0 \quad (10)$$

Dengan menggunakan metode Newton-Raphson yang mempunyai persamaan umum sebagai berikut:

$$v_{n+1} = v_n - \frac{f(v_n)}{f'(v_n)} \tag{11}$$

diperoleh

$$f(k) = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln v_i}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{1}{k} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln v_i \tag{12}$$

$$f'(k) = \sum_{i=1}^n v_i^k (\ln v_i)^2 - \frac{1}{k^2} \sum_{i=1}^n v_i^k (k \ln v_i - 1) - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln v_i \right) \left(\sum_{i=1}^n v_i^k \ln v_i \right) \tag{13}$$

Setelah nilai *k* dapat ditentukan, nilai *c* kemudian dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^k}{n} \tag{14}$$

Distribusi Rayleigh

Fungsi distribusi kedua yang diterima secara luas digunakan dalam pemodelan kecepatan angin adalah fungsi Rayleigh. Distribusi Rayleigh dikenal sebagai kasus khusus dari distribusi Weibull. Fungsi ini biasanya ditemukan pada pemodelan kecepatan angin di beberapa daerah potensi angin di mana fungsi Weibull tidak bisa akurat, dimana nilai k adalah 2. Pada sebuah daerah di mana angin fungsi Weibull adalah model bagi kecepatan angin, mungkin tepat untuk model kecepatan angin dengan fungsi Rayleigh. Hal ini didasarkan pada perubahan parameter bentuk, bentuk variabel dependen "k ≠ 2" untuk fungsi Weibull ke variabel independen "k = 2" untuk fungsi Rayleigh.

Probability density function (PDF) untuk Distribusi Rayleigh didefinisikan dengan Persamaan;

$$f_r = \frac{2v}{c^2} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right] \tag{15}$$

Dimana C adalah parameter skala untuk k=2 dan *f_r* adalah PDF untuk Distribusi Rayleigh.

Dan *cumulative distribution function* (CDF) didefinisikan dengan persamaan;

$$F_r = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right] \tag{16}$$

Dimana *F_r* adalah CDF untuk distribusi Rayleigh.

Parameter skala Rayleigh *C_r* dirumuskan dengan;

$$c_r = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \tag{17}$$

dimana *C_r* adalah parameter skala Rayleigh dan *v_i* kecepatan angin pada setiap waktu *i*

Estimasi Energi pada Daerah Potensi Angin

Densitas energi angin dan energi yang tersedia selama periode biasanya diambil sebagai tolak ukur untuk mengevaluasi potensi energi. Densitas energi angin (E_D) adalah energi yang tersedia dalam rezim untuk luas rotor dan waktu. Dengan demikian, E_D adalah fungsi dari kecepatan angin dan distribusi dalam rezim tersebut. Kita bisa mencapai pada total energi yang tersedia di spektrum (E_s), dengan mengalikan Densitas energi angin dengan faktor waktu.

Faktor-faktor lain yang menarik adalah kecepatan angin yang frekuensinya tinggi ($V_F \max$) dan kecepatan memberikan kontribusi energi maksimum ($V_E \max$) ke pada rezim. Puncak kurva probabilitas density mewakili $V_F \max$. Karena hubungan kecepatan daya angin, kecepatan memberikan kontribusi energi maksimum biasanya lebih tinggi dari kecepatan angin frekuensi tinggi. SKEA (Sistem Konversi Energi Angin) beroperasi pada efisiensi maksimum pada kecepatan angin desain V_d . Oleh karena itu, menguntungkan bahwa V_d dan $V_E \max$ dibuat sedekat mungkin. Setelah kecepatan untuk energi maksimum dapat diidentifikasi untuk situs tertentu, perancang dapat merancang sistem untuk menjadi yang paling efisien pada kecepatan ini atau lebih praktis, perencana dapat memilih mesin yang memiliki desain kecepatan angin sangat dekat dengan $V_E \max$, jika ia tidak dibatasi oleh faktor-faktor lain. Pada bagian berikut kita akan membahas metode untuk memperkirakan potensi energi angin berdasarkan indeks di atas, dengan mempertimbangkan baik model Weibull dan Rayleigh.

Untuk setiap satuan luas rotor, daya yang tersedia (P_v) dalam aliran angin dengan kecepatan V adalah;

$$P_v = \frac{1}{2} \rho_a V^3 \quad (18)$$

Fraksi waktu yang kecepatan V ini berlaku di rezim diberikan oleh $f(V)$. Energi per satuan waktu diberikan oleh V adalah $P_v f(V)$. Dengan demikian total energi, diberikan oleh semua kemungkinan kecepatan pada daerah potensi angin, untuk satuan luas rotor dan waktu dapat dinyatakan sebagai;

$$E_D = \int_0^{\infty} P_v f(V) dV \quad (19)$$

kita memperoleh densitas energi dengan;

$$E_D = \frac{\rho_a c^3}{2} \frac{3}{k} \Gamma\left(\frac{3}{k}\right) \quad (20)$$

Setelah E_D diketahui, energi yang tersedia selama periode (E_I) dapat dihitung dengan;

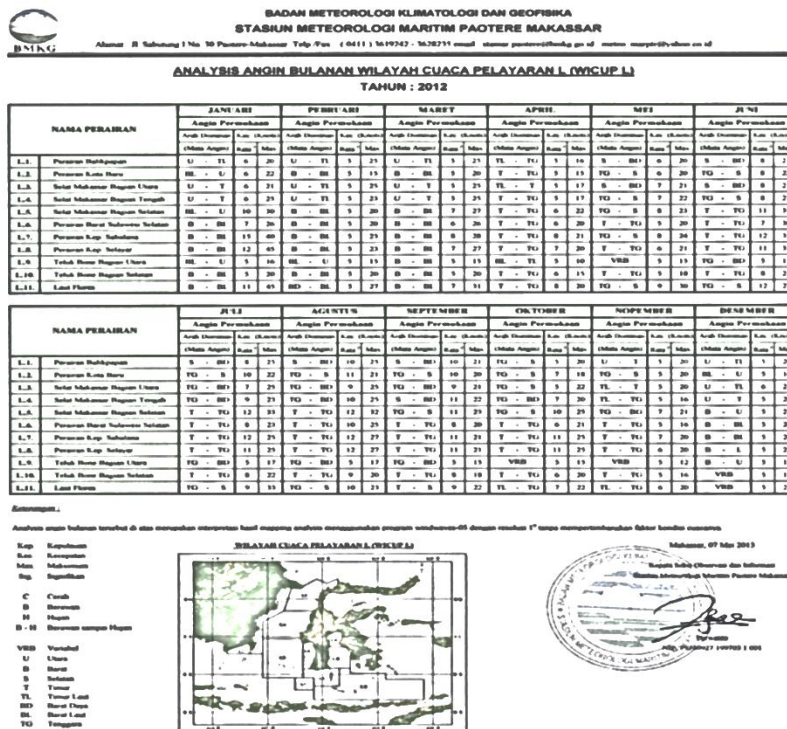
$$E_I = E_D T = \frac{\rho_a c^3 T}{2} \frac{3}{k} \Gamma\left(\frac{3}{k}\right) \quad (21)$$

di mana T adalah periode waktu. Sebagai contoh, T diambil 24, ketika kita menghitung energi setiap hari.

METODELOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan untuk wilayah perairan Barat dan Selatan Pulau Sulawesi yaitu Perairan Balikpapan, Perairan Kota Baru, Selat Makassar Bagian Utara, Selat Makassar Bagian Tengah, Selat Makassar Bagian Selatan, Perairan Barat Sulawesi Selatan, Perairan Kep. Sabalana, Perairan Kep. Selayar, Teluk Bone Bagian Utara, Teluk Bone Bagian Selatan, dan Laut Flores.

Penyajian Data

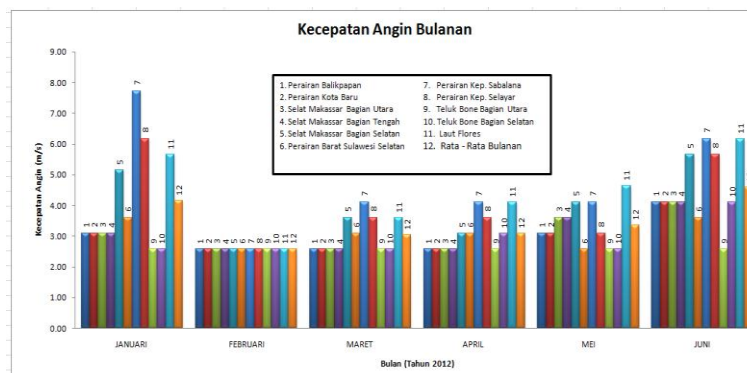


Gambar 2. Data Kecepatan Angin Rata – Rata di Perairan Barat dan Selatan Pulau Sulawesi (Sumber: BMKG Maritim Paotere, 2012)

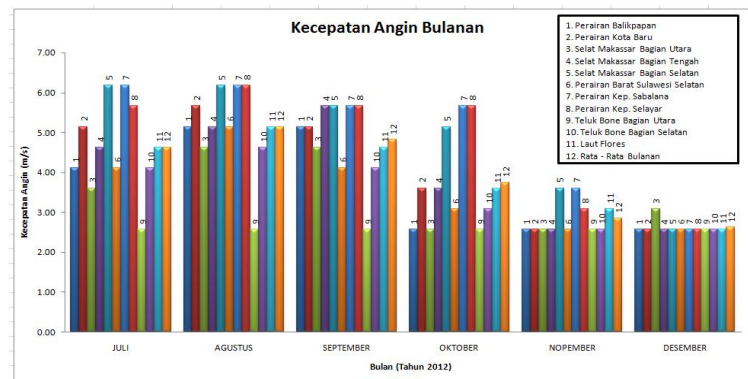
HASIL DAN BAHASAN

Data Angin

Data kecepatan angin yang akan digunakan dalam perhitungan ini adalah data yang diperoleh dari BMKG Maritim Poetere selama tahun 2012. Nilai rata-rata kecepatan angin bulanan diperkirakan dari data yang tersedia sepanjang tahun 2012 disajikan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Pada grafik terlihat bahwa kecepatan angin tertinggi adalah 15 knot (7,72 m/s) yang terjadi pada bulan Januari di Perairan Perairan Kep. Sabalana, Sementara kecepatan angin terendah 5 knot (2,57 m/s) yang terjadi di hampir semua bulan dan khusus pada bulan Februari kecepatan angin terendah terjadi di semua perairan.



Gambar 3. Grafik Kecepatan Angin Bulan Januari - Juni (2012)



Gambar 4. Grafik Kecepatan Angin Bulan Juli - Desember (2012)

Pada gambar 3 dan 4 juga disajikan kecepatan angin rata – rata bulanan dari semua perairan (No. 12). Dari data ini dapat dilihat bahwa kecepatan rata – rata angin cenderung tinggi sekitar bulan Juni - Oktober, sedangkan pada bulan November – Mei, kecepatan rata – rata angin rendah. Berdasarkan data ini, turbin angin terapung yang akan digunakan untuk mengkonversi energi angin di wilayah ini sebaiknya dirancang untuk dapat bergerak atau dipindahkan (mobile), sehingga turbin dapat dipindahkan lokasinya pada bulan November – Mei ke wilayah perairan yang mempunyai kecepatan rata – rata yang tinggi.

Nilai rata-rata angin tahunan, bahwa kecepatan angin maksimum terjadi di Perairan Kep. Sabalana dengan nilai kecepatan angin adalah 9,5 knot (4,89 m/s) sedangkan nilai kecepatan angin terendah adalah 5 knot (2,57 m/s) yang terjadi di Perairan Teluk Bone Bagian Utara.

Analisis Data Angin

Berdasarkan data yang disajikan di atas, analisa dilakukan untuk menghitung densitas energi dari setiap perairan. Data pada daerah perairan Balikpapan akan digunakan sebagai contoh perhitungan untuk menentukan densitas energi. Densitas energi pada daerah perairan lainnya didapatkan dengan menggunakan prosedur yang sama.

Untuk memprediksi distribusi angin, distribusi Weibull dan Rayleigh akan digunakan. Distribusi Weibull dan Rayleigh dicirikan oleh dua fungsi yakni *Probability density function* (PDF) dan *cumulative distribution function* (CDF).

Faktor Skala (c) dan Faktor Bentuk (k)

Nilai c dan k dapat ditentukan dengan menggunakan metode *regresi linear* (metode grafik) dan *maximum likelihood method* (Metode Keserupaan Maximum).

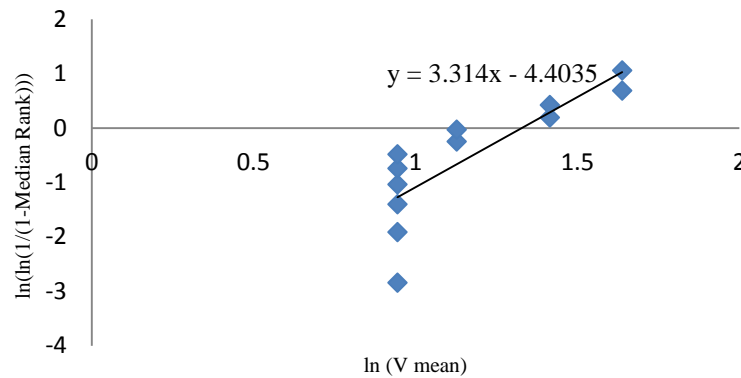
Metode Regresi Linier

Pada metode ini, data kecepatan rata – rata angin perbulan diplot kedalam sebuah grafik, kemudian garis persamaan linear dibuat berdasarkan data tersebut. Berikut contoh perhitungan faktor bentuk k dan faktor skala c dengan menggunakan data kecepatan angin rata – rata perairan Balikpapan.

Dengan memplot nilai $\ln(V_{\text{mean}})$ sepanjang sumbu X dan nilai $\ln(\ln(1/(1-F(x))))$ sepanjang sumbu Y , kemudian diperoleh persamaan regresi linear $y = 3,314x - 4,403$ seperti terlihat pada Gambar 5, sehingga dapat disimpulkan bahwa $k = 3,314$ sedangkan nilai c dapat diperoleh dengan cara berikut:

$$c = e^{-\left(\frac{4,403}{3,314}\right)}$$

$$c = 3,776$$



Gambar 5. Estimasi Regresi Linear Data Angin Perairan Balikpapan

Dengan menggunakan program *Wind Energy and Conversion System Analysis (WECSA) Version 1.0* yang dibuat oleh Mahmuddin (2013) diperoleh nilai *k* dan *c* untuk semua perairan seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Faktor *k* dan *c* dengan Metode Regresi Linear untuk Semua Perairan

No	Nama Perairan	<i>K</i>	<i>C</i>
1	Perairan Balikpapan	3,314	3,776
2	Perairan Kota Baru	3,159	4,0196
3	Selat Makassar Bagian Utara	4,237	3,645
4	Selat Makassar Bagian Tengah	3,368	3,994
5	Selat Makassar Bagian Selatan	3,334	4,987
6	Perairan Barat Sulawesi Selatan	4,4697	3,673
7	Perairan Kep. Sabalana	3,082	5,495
8	Perairan Kep. Selayar	2,975	5,043
9	Teluk Bone Bagian Utara	-	-
10	Teluk Bone Bagian Selatan	3,987	3,577
11	Laut Flores	3,834	4,649

Nilai *k* dan *c* dari perairan Teluk Bone Bagian Utara tidak dapat ditentukan dengan menggunakan metode regresi linear karena rata – rata kecepatan angin pada daerah tersebut semuanya sama yaitu 5 Knot (2,572 m/s).

Metode Keserupaan Maximum

Metode ini membutuhkan proses iterasi yang sulit/tidak dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak standar, maka proses perhitungannya secara detail tidak diperlihatkan. Metode ini hanya diimplementasikan secara langsung ke dalam WECSA ver 1.0 berdasarkan teori yang telah dijelaskan sebelumnya. Dengan menggunakan program WECSA ver 1.0 ini, didapatkan nilai *k* dan *c* yang sajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Faktor *k* dan *c* dengan Metode Keserupaan Maximum untuk Semua Perairan

No	Nama Perairan	<i>K</i>	<i>C</i>
1	Perairan Balikpapan	0,906	2,98
2	Perairan Kota Baru	0,89	2,97
3	Selat Makassar Bagian Utara	0,914	3,645
4	Selat Makassar Bagian Tengah	0,89	3,075
5	Selat Makassar Bagian Selatan	0,84	3,48
6	Perairan Barat Sulawesi Selatan	0,91	2,993
7	Perairan Kep. Sabalana	0,82	3,66
8	Perairan Kep. Selayar	0,84	3,475
9	Teluk Bone Bagian Utara	1,03	2,64
10	Teluk Bone Bagian Selatan	0,92	2,93
11	Laut Flores	0,851	3,38

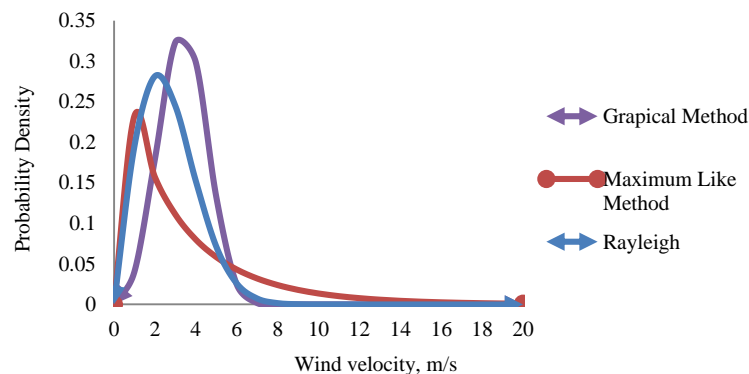
Metode Rayleigh

Tabel 4. Faktor k dan c untuk Distribusi Rayleigh untuk Semua Perairan

No	Nama Perairan	K	C
1	Perairan Balikpapan	2,00	3,032
2	Perairan Kota Baru	2,00	3,478
3	Selat Makassar Bagian Utara	2,00	2,872
4	Selat Makassar Bagian Tengah	2,00	3,445
5	Selat Makassar Bagian Selatan	2,00	5,391
6	Perairan Barat Sulawesi Selatan	2,00	2,944
7	Perairan Kep. Sabalana	2,00	6,318
8	Perairan Kep. Selayar	2,00	5,469
9	Teluk Bone Bagian Utara	2,00	1,654
10	Teluk Bone Bagian Selatan	2,00	2,729
11	Laut Flores	2,00	4,719

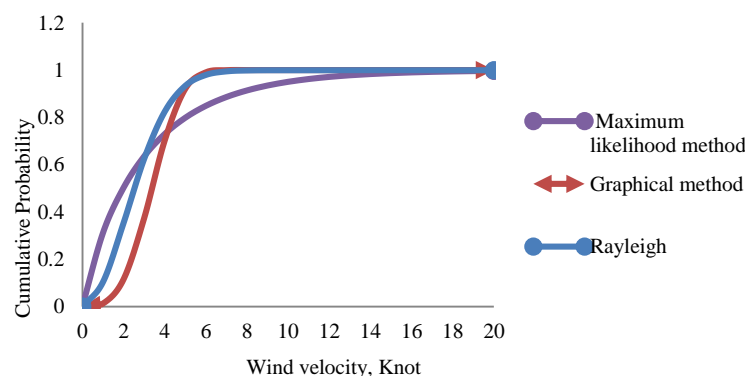
Probability Density Function (PDF) dan Cumulative Distribution Function (CDF)

Probability Density Function (PDF) dapat ditentukan setelah faktor k dan c didapatkan.



Gambar 6. Grafik *Probability Density Function* Perairan Balikpapan

Dari Gambar 6 di atas terlihat bahwa berdasarkan metode regresi linear, probabilitas tertinggi terjadinya angin di daerah perairan Balikpapan adalah pada kecepatan angin diantara 3 – 6 m/s, sedangkan berdasarkan perhitungan menggunakan metode keserupaan maksimum, probabilitas tertinggi di daerah tersebut adalah 0,5 – 1,5 m/s. Untuk metode Rayleigh kecepatan angin tertinggi pada perairan Balikpapan adalah 2 – 4 m/s.



Gambar 7. Grafik *Cumulative distribution Function* Perairan Balikpapan

Dari grafik di atas dapat diketahui bahwa berdasarkan perhitungan metode regresi linear dan metode Rayleigh, angin pada perairan Balikpapan cenderung berhembus pada kecepatan di bawah 5,5 m/s, sedangkan berdasarkan metode keserupaan maksimum, angin masih dapat berhembus sampai pada kecepatan 12 m/s.

Densitas Energi

Setelah nilai *k* dan *c* didapatkan, maka nilai densitas energi angin data tersebut dapat ditentukan sebagai berikut:

Untuk metode regresi linier, Dengan menggunakan nilai *k* = 3,314 dan *c* = 3,776 dan masa jenis udara $\rho_a = 1,2754 \text{ kg/m}^3$ diperoleh nilai densitas energi angin:

$$E_D = \frac{1,2754 \times 3,776^3}{2} \frac{3}{3,314} \Gamma\left(\frac{3}{3,314}\right) = 33,08 \text{ Watt/m}^2$$

Sedangkan densitas energi angin dengan menggunakan metode keserupaan maksimum dimana nilai *k* = 0,906 dan *c* = 2,977 adalah sebesar:

$$E_D = \frac{1,2754 \times 2,977^3}{2} \frac{3}{0,906} \Gamma\left(\frac{3}{0,906}\right) = 144,89 \text{ Watt/m}^2$$

Nilai *E_D* yang telah diketahui tersebut adalah nilai energi angin yang tersedia setiap hari, maka untuk mengetahui densitas energi selama 30 hari adalah;

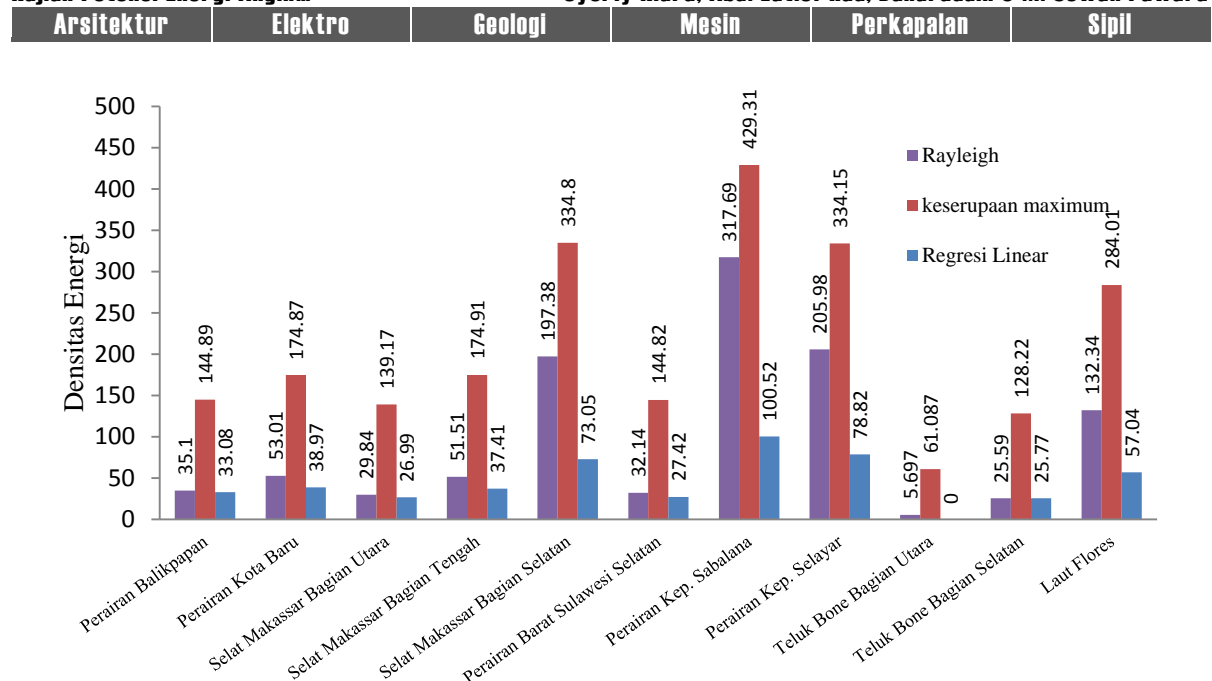
$$E_I = 33,08 \times 30 \quad ; \quad E_I = 992,4 \text{ W/m}^2 / \text{day}$$

Dengan menggunakan prosedur perhitungan yang sama, densitas energi dari seluruh perairan dapat kita peroleh seperti yang disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Densitas Energi dari Seluruh Perairan

No	Nama Perairan	metode regresi linear (Watt/m ²)	metode keserupaan maximum (Watt/m ²)	Rayleigh (Watt/m ²)
1	Perairan Balikpapan	33,08	144,89	35,1
2	Perairan Kota Baru	38,97	174,87	53,01
3	Selat Makassar Bagian Utara	26,99	139,17	29,84
4	Selat Makassar Bagian Tengah	37,41	174,91	51,51
5	Selat Makassar Bagian Selatan	73,05	334,8	197,38
6	Perairan Barat Sulawesi Selatan	27,42	144,82	32,14
7	Perairan Kep. Sabalana	100,52	429,31	317,69
8	Perairan Kep. Selayar	78,82	334,15	205,98
9	Teluk Bone Bagian Utara	-	61,087	5,697
10	Teluk Bone Bagian Selatan	25,77	128,22	25,59
11	Laut Flores	57,04	284,01	132,34

Seperti yang dapat kita lihat dari gambar 8, densitas energi yang terbesar adalah pada perairan Kepulauan Sabalana berdasarkan ketiga metode yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 8. Grafik Densitas Energi semua Perairan

Sistem Konversi

Dari hasil pembahasan ini dapat dilihat bahwa kecepatan rata – rata angin cenderung tinggi sekitar bulan Juni - Oktober, sedangkan pada bulan November – Mei, kecepatan rata – rata angin rendah. Jadi dapat diketahui bahwa kecepatan angin akan berbeda pada sebuah daerah tertentu pada jangka waktu tertentu.

Berdasarkan hal tersebut diatas, turbin angin terapung yang akan digunakan untuk menkonversi energi angin di wilayah ini sebaiknya dirancang untuk dapat bergerak atau dipindahkan (mobile), sehingga turbin dapat dipindahkan lokasinya pada bulan November – Mei ke wilayah perairan yang mempunyai kecepatan rata – rata yang tinggi. Dengan demikian, turbin akan dapat dipindahkan ke lokasi yang mempunyai potensi angin yang lebih besar tergantung waktu atau musim.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, direkomendasikan untuk menggunakan turbin angin terapung tipe tongkang. Dengan tipe ini, beberapa turbin dapat ditempatkan dalam satu struktur yang sama sehingga akan memudahkan pemindahan turbin.

SIMPULAN

1. Kecepatan angin yang diamati selama periode Januari sampai Desember 2012, kecepatan angin bulanan yang terbesar diseluruh perairan terjadi disekitar bulan Juni – September. Kecepatan angin tahunan yang terbesar terjadi di Kep. Sabalana sebesar 4,89 m/s
2. Densitas energi angin rata – rata berada di kisaran 25,77 - 100,52 W/m^2 untuk metode regresi linear sedangkan metode keserupaan maksimum dikisaran 61,087- 429,31 W/m^2 dan metode Rayleigh pada kisaran 5,697 - 317,69 W/m^2 .
3. Analisis menunjukkan bahwa daerah yang berpotensi besar memiliki energi angin untuk pembangkit listrik terdapat pada perairan, Perairan Kep. Sabalana, Perairan Kep. Selayar, dan Selat Makassar Bagian Selatan.
4. Direkomendasikan untuk menggunakan turbin terapung tipe tongkang yang dapat memudahkan mobilitas struktur turbin saat akan dipindahkan.

DAFTAR PUSTAKA

Indonesia Energy Outlook 2010

IEA, World Energy Outlook 2008

CITE AS: Boden, T.A., G. Marland, and R.J. Andres. 2010. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi 10.3334/CDIAC/00001_V2010. April 2013 http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_glob.html

Habibie, N.dkk., 2011, *Kajian Potensi Energi Angin di Wilayah Sulawesi dan Maluku.*, Puslitbang BMKG.

Lorenz, Edward N., The nature and theory of the general circulation of the atmosphere., p110 WMO No. 218 TP.115. World Meteorological Organization

Smil, Vaclav, 2004, Inherent limits of renewable energies.

Smil, Vaclav, 2003, Energy at the crossroads. MIT.

Wind Energy – The Facts, Volume 1, European Commission, Directorate-General for Energy, 1999.

van Wijk, A.J.M. and Coelingh, J.P., 1993, Wind Power Potential in the OECD Countries, December.

Personal communication from Hughes, P, and Hurley, B. Airtricity

Garrad Hassan and Partners, 1995, Windtest KWK, Germanischer Lloyd.

BP Statistical Review of World Energy June 2006

Bagbanci, H. (2011). “Dynamic Analysis of Offshore Floating Wind Turbin”. Master Thesis, Instituto Superior Tecnico, Portugal

Butterfield, S. Musial, W and Jonkman, J., 2007, *Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines.* Denmark: Conference Paper NREL/CP-500-38776 September.

Mathew Sathyajith, 2006, *WIND ENERGY: Fundamentals, Resource Analysis and Economics.* Netherlands: Springer.

Mahmuddin, F. (2013). “Studi Densitas Energi Menggunakan Distribusi Weibull”, *Jurnal Riset dan Teknologi Kelautan*, Vol. 11, No.1.

Arsitektur	Elektro	Geologi	Mesin	Perkapalan	Sipil
-------------------	----------------	----------------	--------------	-------------------	--------------