

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Energi Baru Terbarukan

Energi terbarukan, sebagaimana dijelaskan dalam Undang-Undang Nomor 30 tahun 2007 tentang energi, merujuk pada sumber energi yang dapat diperbaharui, seperti panas bumi, angin, bioenergi, sinar matahari, aliran dan terjunan air, serta gerakan dan perbedaan suhu lapisan laut. Sumber energi ini ramah lingkungan, tidak mencemari, dan tidak berkontribusi pada perubahan iklim atau pemanasan global. Konsep ini muncul karena energi tersebut dihasilkan dari proses alami yang dapat terus berlangsung, seperti panas matahari, angin, air, bahan bakar nabati, dan panas bumi (Wiranata et al., 2018).

Pentingnya energi terbarukan tidak hanya berkaitan dengan ketersediaan sumber daya, tetapi juga dengan dampak positifnya terhadap lingkungan dan ekologi. Energi yang dihasilkan dari sumber daya terbarukan tidak berdampak negatif pada lingkungan, merupakan alasan utama mengapa Energi Baru Terbarukan (EBT) sangat terkait dengan isu-isu lingkungan dan ekologi.

Indonesia, sebagai negara yang memiliki potensi besar dalam pengembangan energi terbarukan, memiliki peluang untuk memanfaatkan sumber daya ini secara optimal. Dengan begitu, negara dapat tidak hanya memenuhi kebutuhan energi, tetapi juga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan energi terbarukan di Indonesia menjadi sebuah langkah strategis untuk mencapai keberlanjutan dalam pemanfaatan sumber daya energi, Potensi ini dapat terlihat dari tabel yang disajikan di bawah ini.

**Tabel 2.1** Potensi Energi Terbarukan di Indonesia (Wiranata et al., 2018)

Jenis Energi Terbarukan	Potensi (Mega Watt)
Angin ( <i>wind</i> )	950
Surya ( <i>solar power</i> )	11.000
Air ( <i>hydro power</i> )	75.000

Biomassa	32
Biofuel	32
Energi Laut ( <i>ocean</i> )	60.000
Panas Bumi ( <i>Geothermal</i> )	29.000

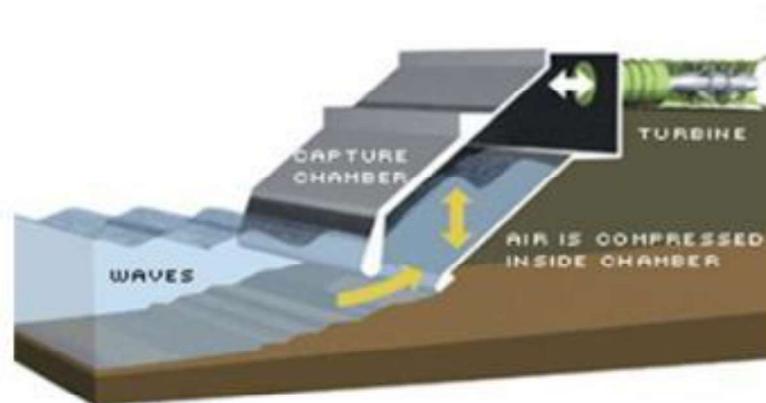
### 2.1.1 Energi Laut

Indonesia, sebagai salah satu negara dengan wilayah laut terluas di dunia, memiliki potensi energi surya yang sangat besar karena tersebar sepanjang jalur sabuk gunung api dan memiliki radiasi penyinaran sebesar 4.80 kWh/m<sup>2</sup>/hari. Energi laut, yang berasal dari gerakan dan perbedaan suhu lapisan laut, mencakup energi pasang surut, gelombang, arus laut, dan perbedaan suhu lapisan laut (Wiranata et al., 2018). Ada beberapa macam pemanfaatan yang dapat dilakukan pada potensi laut indonesia, seperti yang akan dibahas selanjutnya.

- a. Prinsip operasi dalam mengubah energi gelombang laut menjadi energi listrik melibatkan proses pengumpulan energi dari gelombang laut untuk menggerakkan turbin. Keberadaan aspek ini menjadi sangat signifikan sebagai panduan untuk memilih suatu wilayah yang memiliki potensi besar dalam akumulasi energi berdasarkan topografinya. Hingga saat ini, penelitian terus dilakukan dengan tujuan mencapai hasil optimal untuk implementasi. Salah satu alternatif dalam teknologi pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL) yang menawarkan output energi yang stabil adalah teknologi *Oscillating Water Column*. *Teknologi Oscillating Water Column* menggunakan pergerakan naik-turun air gelombang laut sebagai daya penggerak untuk turbin (Wiranata et al., 2018). Ada beberapa pemanfaatan untuk merubah gelombang laut menjadi energi listrik, salah satunya adalah.

*Sistem Oscillating Water Column*, dimana energi kinetik yang terdapat dalam gelombang air laut dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin. Gelombang naik ke dalam ruang chamber, di mana air yang naik akan menekan udara keluar dari ruang

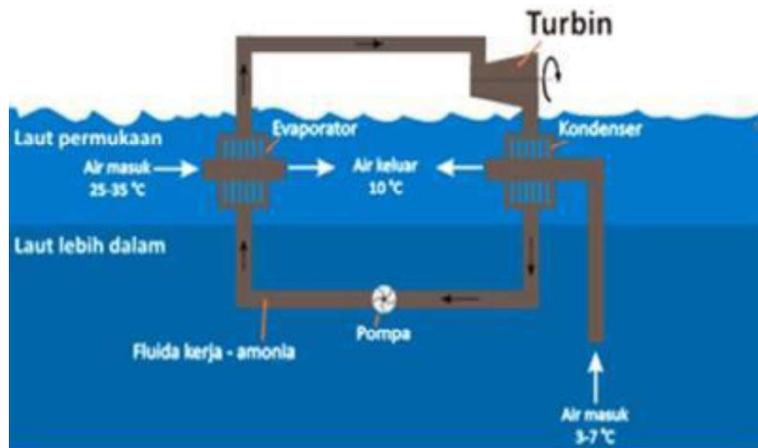
chamber tersebut. Tekanan ini menyebabkan turbin berputar ketika air turun, dan udara bertiup dari luar ke dalam ruang chamber, mengakibatkan putaran turbin kembali. Ilustrasinya dapat dilihat pada gambar di bawah ini untuk pemahaman yang lebih mendalam.



**Gambar 2.1** Sistem *Oscillating Water Column*

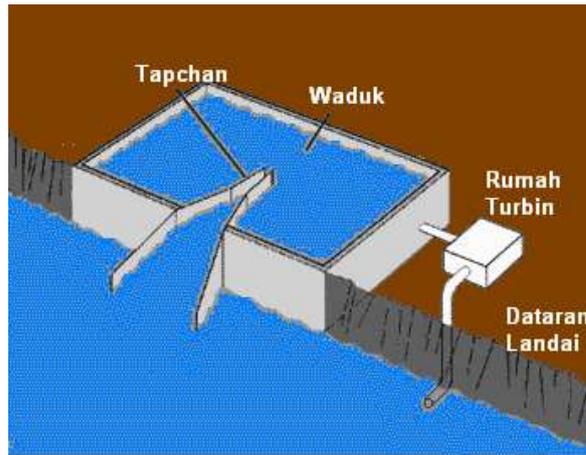
(Sumber: Wiranata et al., 2018)

- b. Perbedaan suhu air laut, adalah salah satu metode lain untuk menghasilkan listrik dari gelombang air laut dengan menggunakan perbedaan suhu di laut. Saat berenang atau menyelam, kita akan mengalami penurunan suhu air laut seiring dengan kedalaman. Semakin dalam kita menyelam, semakin rendah suhu air lautnya. Suhu yang lebih tinggi di permukaan laut disebabkan oleh paparan sinar matahari yang memanaskan permukaan laut. Namun, di bawah permukaan laut, suhu menjadi sangat dingin (Wiranata et al., 2018). Sistem yang memanfaatkan perbedaan suhu air laut dapat dilihat dalam gambar di bawah ini.



**Gambar 2.2** Sistem Perbedaan Suhu Air Laut  
(Sumber: Wiranata et al., 2018)

- c. Pasang surut air laut, salah satu cara lain untuk menggunakan energi gelombang laut adalah melalui energi pasang surut. Saat air pasang mencapai pantai, air pasang akan diakumulasi di dalam reservoir. Selanjutnya, saat air surut, air yang berada di belakang reservoir dapat dialirkan, mengikuti prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) konvensional, sebagaimana terlihat dalam gambar selanjutnya. Agar sistem ini beroperasi secara optimal, diperlukan gelombang pasang yang signifikan, dengan perbedaan ketinggian sekitar 16 kaki antara gelombang pasang dan gelombang surut. Kriteria ini hanya terpenuhi di beberapa lokasi, dan sejumlah pembangkit listrik telah dioperasikan dengan menggunakan sistem ini. Sebagai contoh, pembangkit listrik di Prancis telah berhasil beroperasi dan mampu memenuhi kebutuhan listrik untuk 240.000 rumah, dapat dijelaskan oleh gambar di bawah ini.



**Gambar 2.3** Sistem Pasang Surut Air Laut  
(Sumber: Wiranata et al., 2018)

- d. Arus laut, yang merupakan pergerakan massa air laut dari satu lokasi ke lokasi lain, baik secara vertikal maupun secara horizontal. Salah satu contoh pengaruh pada pergerakan ini adalah gaya Coriolis, yang menyebabkan pembelokan arah arus akibat rotasi bumi. Pembelokan tersebut condong ke arah kanan di belahan bumi utara dan ke arah kiri di belahan bumi selatan. Fenomena ini menghasilkan aliran *Gyre* searah jarum jam di belahan bumi utara dan berlawanan arah jarum jam di belahan bumi selatan. Fenomena ini dikenal sebagai spiral Ekman, yang menggambarkan perubahan arah arus dari pengaruh angin menjadi pengaruh gaya Coriolis

Daya yang dapat dihasilkan dari pembangkit listrik arus laut dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Made et al., 2017):

$$P = 0.5 \times \rho \times A \times V^4 \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan:

P = Daya *Output* (watt)

$\rho$  = Berat Jenis ( $1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )

A = luas permukaan turbin ( $\text{m}^2$ )

V = Kecepatan arus (m/s)

Mengingat bahwa pembangkit energi dari arus laut mengalami kerugian pada turbinnya, persamaan daya keluaran pembangkit menjadi:

$$P = C_p \times 0.5 \times \rho \times A \times V^4 \dots\dots\dots(2.2)$$

dengan:

CP = konstanta performa turbin

Ketika kita melihat pola arus di perairan Indonesia pada kondisi pasang purnama dan pasang perbani, terlihat bahwa kecepatan arus umumnya tidak terlalu besar, kecuali di daerah Selat Bali, Selat Lombok, dan Selat Makassar.

Penggunaan arus laut untuk menghasilkan listrik telah mulai diimplementasikan dalam skala kecil oleh beberapa institusi dan perguruan tinggi. Dengan potensi termal sebesar  $2.5 \times 10^{23}$  Joule dan efisiensi konversi energi panas laut sebesar tiga persen, Indonesia memiliki potensi daya sekitar 240.000 MW di perairan dengan suhu rata-rata permukaan laut di atas 28°C.

### 2.1.2 Karakteristik Selat Sunda

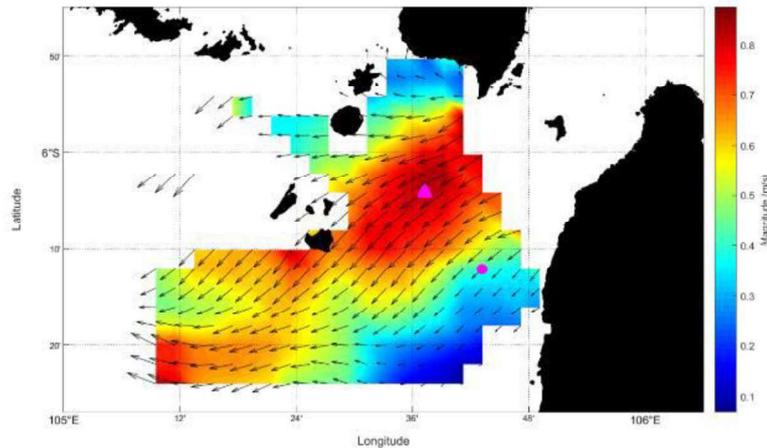
Selat Sunda memiliki signifikansi yang besar, baik dari perspektif oseanografi maupun perikanan. Dinamika massa air di wilayah ini dipengaruhi oleh aliran dua massa air utama, yaitu massa air Laut Jawa dan Samudera Hindia. Campuran kedua massa air tersebut memberikan dampak positif terhadap kualitas air di selat (Amri, 2008)

Secara topografis, Selat Sunda menunjukkan gradasi kedalaman yang signifikan dari arah timur laut ke arah barat laut. Di bagian utara selat, kedalaman laut hanya mencapai sekitar 40 meter, namun kemudian dasar laut perlahan-lahan menurun ke arah barat daya, mencapai kedalaman sekitar 75 hingga 100 meter. Selanjutnya, semakin ke arah barat daya, dasar laut tiba-tiba menurun secara drastis, menciptakan kedalaman laut yang berkisar antara 700 hingga 1200 meter.

Menurut (Pranowo, 2022) sebelah bagian selatan Jawa Barat terdapat aliran besar yang dikenal sebagai Arus Katulistiwa Selatan yang secara konsisten mengalir ke arah barat. Namun, selama musim Barat terdapat aliran sempit yang bergerak ke arah timur yang disebut Arus Pantai Jawa. Selat Sunda berperan sebagai jalur penghubung antara Laut Jawa dan Samudra Hindia, dimana terjadi pertukaran air antara kedua laut tersebut di dalam Selat Sunda.

Secara garis besar, arus air biasanya mengalir menuju Samudra Hindia karena tingginya permukaan air di Laut Jawa dibandingkan dengan Samudra Hindia. Laut Jawa dan wilayah selatan Laut Cina Selatan merupakan sumber air dengan salinitas yang rendah. Pengaruh dari sungai besar seperti di Sumatra, Kalimantan, dan Jawa memiliki dampak yang lebih besar terhadap penurunan salinitas daripada curah hujan. Di sisi lain, air di Samudra Hindia cenderung memiliki tingkat salinitas yang tinggi karena aliran air dari Laut Merah dan Teluk Persia.

Menurut (Serodja et al., 2022) arus yang dimiliki oleh selat Sunda, data pengukuran menunjukkan bahwa selama periode Mei hingga Juli 2019, yang merupakan musim timur, arus laut di Selat Sunda bergerak ke arah barat daya. Kecepatan rata-rata arus permukaan selama periode tersebut mencapai 0.53 m/s, sementara kecepatan arus maksimum mencapai 0.87 m/s dan terjadi di tengah Selat. Rincian ini dihasilkan dari penelitian yang melibatkan pengukuran langsung arus laut selama bulan Mei hingga Juli 2019 di Selat Sunda pada gambar 2.4 di bawah ini.



**Gambar 2.4** Energi Laut Selat Sunda

(Sumber: Duniaenergi.com)

Pengembangan turbin di wilayah Selat Sunda ini diharapkan dapat menjadi teladan bagi penerapannya di selat-selat lain di Indonesia. Hal ini disebabkan oleh kedekatan Selat Sunda dengan pusat riset, baik yang dimiliki oleh BRIN maupun universitas-universitas di Indonesia. Selain itu, wilayah ini juga berdekatan dengan pusat pemerintahan, sehingga memiliki potensi besar untuk menjadi proyek riset awal dalam pengembangan Turbin Arus. Seperti perbandingan potensi selat lain tahun 2019 yang disajikan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 2.2** Potensi Arus Laut Selat Indonesia (Orhan et al., 2019)

No	Selat	Densiti Energi Kinetik (kW/m <sup>2</sup> )	Energi Pembangkit yang dihasilkan (kW)	Luas area (km <sup>2</sup> )	Total energi yang dibangkitkan dengan kecepatan aliran 0,5 m/s (MW)
1	Bali	14.75	1,459	104	1,045
2	Larantuka	10.20	1,25	6	299
3	Boling	3.49	430	106	736
4	Alas	3.07	396	403	2,258
5	Lombok	2.36	236	114	865
6	Sunda	1.56	165	145	335
7	Badung	1.52	161	162	551

## 2.2 Rotor Savonius

Rotor Savonius merupakan salah satu jenis rotor yang umumnya dipergunakan oleh daya angin yang dikenal dengan pengoperasiannya berdasarkan prinsip daya *drag*, yang menghasilkan energi mekanik dari gaya dorong angin pada bucket atau sudu yang memutar rotor. Konstruksi dasar Rotor Savonius melibatkan dua hingga tiga sudu yang disusun dalam pola khusus, memberikan tampilan seperti huruf "S" jika dilihat dari atas. Ketika angin melalui sudu-sudu ini, tekanan yang dihasilkan oleh aliran angin akan mendorong sudu-sudu tersebut, menyebabkan putaran Rotor.

Parameter penting untuk kinerja aerodinamis dari rotor Savonius adalah aspek rasio yang mewakili tinggi rotor ( $H$ ) relatif terhadap diameter ( $D$ ). Nilai rasio aspek ( $\alpha$ ) yang tinggi akan sangat meningkatkan efisiensi ini, bisa dilihat pada Gambar 2.5 berikut (Menet, 2004).

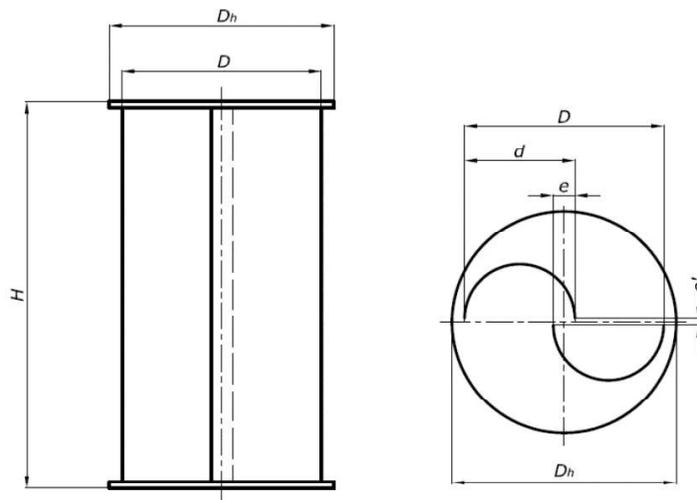
$$\alpha = \frac{H}{D} \dots \dots \dots (2.3)$$

dimana :

$\alpha$  = Sasio Aspek

$H$  = Tinggi Rotor

$D$  = Diameter Rotor



**Gambar 2.5** Skema Rotor Savonius susun tunggal. (a) Tampak depan; (b) Tampak atas (rotor Savonius konvensional :  $e' = 0$ )

(Sumber: Menet, 2004)

Parameter lainnya adalah *Overlap Ratio* ( $\beta$ ), yang mempengaruhi *Overlap* ( $e$ ) dan diameter *Paddle* ( $d$ ). Rasio *Overlap* ( $\beta$ ), dengan parameter ini juga akan dijadikan sebagai variasi pada penelitian, diberikan oleh persamaan berikut (Menet, 2004):

$$\beta = \frac{e}{d} \dots \dots \dots (2.4)$$

dimana:

$\beta$  = Rasio *Overlap*

$e$  = *Overlap* antara *Paddle*

$d$  = Diameter *Paddle*

Rasio *Overlap* ini akan mempengaruhi hasil atau efisiensi dari turbin yang diujikan, dalam penelitian Rotor Savonius arus laut dilakukan oleh (O. B. Yaakob et al., 2013) mendapatkan nilai terbaik untuk rasio *Overlap* ialah 0,21 dengan mendapatkan torsi yaitu 0,387 Nm. Berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh (Akwa et al., 2012) rasio *Overlap* terbaik yang didapatkan adalah 0,15 rata-rata koefisien daya sebesar 0,3161 untuk *tip speed* rasio 1,25 pada turbin Savonius angin.

Rotor Savonius memiliki ciri khas dalam bentuk koefisien daya (CP) dan tip speed ratio (TSR). Koefisien daya (CP) mengukur efisiensi Rotor dalam mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Nilainya berkisar antara 0.08 hingga 1.50. Di sisi lain, *Tip Speed Ratio* (TSR) adalah perbandingan antara kecepatan sudut sudu dengan kecepatan angin yang masuk. Rentang *tip speed ratio* biasanya berkisar antara 0.5 hingga 1.2 (Latif, 2013).

Untuk mengukur kemampuan Rotor Savonius dalam menghasilkan torsi yang diperlukan untuk menggerakkan generator atau perangkat lain, digunakan persamaan khusus yang mencerminkan daya torsi yang dihasilkan oleh Rotor ini (Latif, 2013).

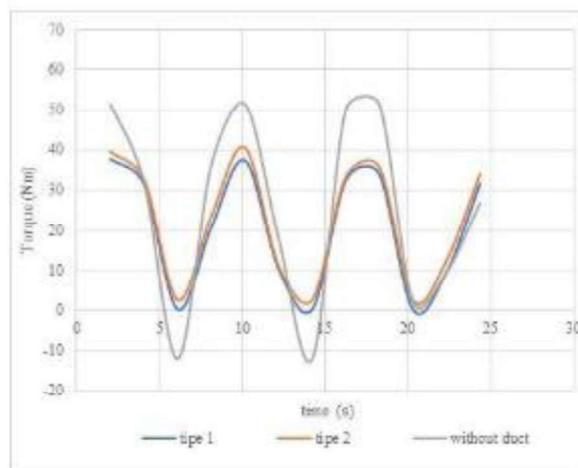
$$P_T = T \cdot \omega_m = T \cdot \frac{2\eta n_g}{60} \dots \dots \dots (2.5)$$

Karena karakteristik khasnya, Rotor Savonius memiliki aplikasi yang luas dalam bidang energi terbarukan, seperti sebagai pemecah ombak atau

dalam pembangkit listrik skala kecil, dan menawarkan alternatif yang menarik dalam upaya memanfaatkan sumber daya energi terbarukan.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa efisiensi prototipe Rotor angin Savonius pada kecepatan angin rendah adalah 4.8%. Efisiensi Rotor angin Savonius meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan angin. Pada kecepatan angin 6.0 m/s, efisiensi Rotor angin Savonius mencapai 14.5 % (Latif, 2013).

Dibuktikan pula dengan penelitian yang dilakukan oleh (Pranatal, 2018) melakukan penelitian pada turbin Savonius dengan kecepatan Kinerja turbin akan dievaluasi melalui pengukuran parameter  $C_p$  (koefisien daya) dan  $C_m$  (koefisien momen) pada setiap Titik Stagnasi Posisi (TSP), bersamaan dengan mempertimbangkan faktor riak torsi. Kecepatan arus laut yang dijadikan sebagai konstan adalah 0.269 m/s, yang mencerminkan kecepatan rata-rata arus laut yang tercatat di bagian barat pulau Giliyang, Madura. Dengan kecepatan arus laut tersebut, turbin mampu menghasilkan torsi yang signifikan, bahkan melebihi 30 Nm seperti pada Gambar 2.6.(Pranatal & Beu, 2018)



**Gambar 2.6** Karakteristik Turbin Savonius

(Sumber: Prantal & Beu, 2018)

### 2.3 Sejarah dan Perkembangan Rotor Savonius

Rotor angin Savonius, yang pertama kali diperkenalkan oleh insinyur Finlandia Sigurd J. Savonius pada tahun 1922, adalah Rotor angin vertikal

yang terkenal dengan sederhananya. Rotor ini mengoperasikan prinsip daya drag, yaitu dengan menghasilkan energi mekanik melalui gaya dorong angin pada sudu-sudu atau bucket yang membentuk strukturnya. Kelebihan utama Rotor ini adalah kemudahan dalam pembuatan dan pemeliharaan karena konstruksinya yang sederhana, sehingga biaya produksinya relatif terjangkau.

Sejarah Rotor angin Savonius mencapai akarnya pada abad ke-19 dengan percobaan awal tentang Rotor angin vertikal. Namun, bentuk modern dari Rotor angin Savonius muncul ketika Sigurd J. Savonius, seorang insinyur Finlandia yang bekerja untuk Angkatan Laut Finlandia, mengembangkannya pada tahun 1922. Awalnya, tujuan pengembangannya adalah untuk menyediakan sumber daya listrik bagi lampu navigasi (Raditya Yudistira et al., 2021)

Penggunaan komersial pertama Rotor angin Savonius tercatat pada tahun 1931 oleh Perusahaan Listrik Helsinki di Finlandia, di mana Rotor ini digunakan untuk memberdayakan pompa air di peternakan. Setelah itu, Rotor angin Savonius mulai digunakan secara luas di seluruh dunia dalam beragam aplikasi, termasuk pembangkit listrik, penyediaan air melalui pompa air, dan sistem ventilasi.

Turbin angin Savonius (SWT) diakui sebagai turbin sumbu vertikal yang sederhana, memiliki karakteristik awal yang sesuai, dan dapat memanfaatkan kecepatan angin rendah. Meskipun lebih cocok untuk aplikasi skala kecil karena ukurannya yang kompak, rotor Savonius memiliki kelemahan seperti efisiensi rendah, membatasi penerapannya dalam skala penuh. Upaya optimasi desain, terutama pada bilah sebagai komponen utama SWT, telah dilakukan oleh sejumlah peneliti.

#### **2.4 *Bezier Curve***

Kurva *Bezier* adalah jenis kurva polinomial yang dibentuk oleh serangkaian titik kontrol. Bentuk dari kurva ini sepenuhnya ditentukan oleh posisi dan jumlah titik kontrol yang digunakan. Kurva *Bezier* memiliki berbagai jenis dan digunakan untuk menggambarkan beragam bentuk, mulai

dari garis lurus hingga kurva yang sangat halus dan bahkan bentuk yang lebih kompleks (Juhari, 2021).

Selain kurva *Bezier*, ada beberapa jenis kurva lainnya, salah satunya adalah kurva B-Spline yang juga dibentuk menggunakan teknik pendekatan. Ada juga kurva cubic spline yang menggunakan teknik interpolasi, yang berarti kurva tersebut melewati melalui titik-titik yang telah ditentukan sebelumnya. Kelebihan kurva *Bezier* dibandingkan dengan kurva *cubic spline* adalah orde yang lebih tinggi dalam persamaan yang digunakan, yang menghasilkan kurva yang lebih halus (Dewi, 2018).

Karakteristik utama dari kurva *Bezier* adalah sebagai berikut:

1. Hanya dua titik kontrol, yaitu titik kontrol pertama dan terakhir, yang berada pada kurva itu sendiri.
2. Titik kontrol lainnya digunakan untuk menentukan orde, turunan, dan bentuk keseluruhan dari kurva.
3. Kurva *Bezier* selalu tangensial terhadap segi empat yang terbentuk oleh titik kontrol pertama dan terakhir.
4. Bentuk dari kurva *Bezier* mengikuti poligon yang dibentuk oleh segi empat yang dihubungkan oleh titik kontrol.

Ketika merancang dan menggunakan kurva *Bezier*, fleksibilitas dan kemudahan dalam menggambarkan berbagai bentuk menjadi keunggulan utamanya. Dengan memahami titik kontrol yang ditempatkan, Anda dapat menciptakan kurva yang sesuai dengan kebutuhan desain, sehingga kurva *Bezier* menjadi alat yang penting dalam dunia desain grafis dan rekayasa. *Bezier Curve* terbagi menjadi beberapa jenis tergantung derajat dan titik kontrolnya yaitu linier, kuadratik dan kubik.

Kurva *Bezier* Linier atau derajat satu memiliki dua titik kontrol. Titik kontrol pertama digunakan untuk menentukan titik awal kurva, sementara titik kontrol kedua menentukan titik akhir kurva. Kurva ini umumnya digunakan untuk menggambarkan garis lurus, sehingga kurva *Bezier* derajat satu memiliki kegunaan terbatas dalam menggambarkan bentuk yang lebih kompleks.

Mengingat titik-titik berbeda  $P_0$  dan  $P_1$ , kurva Bézier linier hanyalah sebuah garis antara dua titik tersebut.

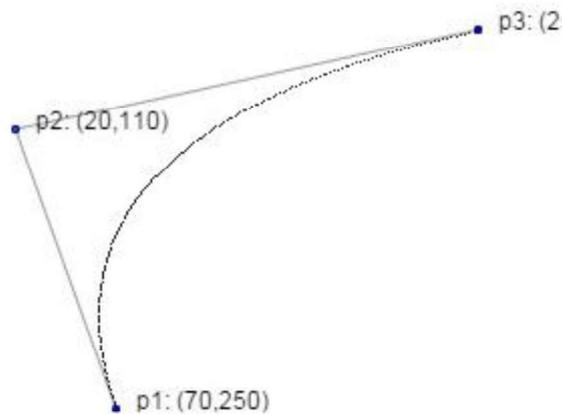
$$B(t) = P_0 + t(P_1 - P_0) = (1 - t)P_0 + tP_1, 0 \leq t \leq 1 \dots \dots \dots (2.6)$$

Setara dengan interpolasi linier, Kuantitas  $P_1 - P_0$  mewakili perpindahan dari titik awal ke titik akhir.

Kurva *Bezier* Kuadratik atau derajat dua memiliki tiga titik kontrol. Titik kontrol pertama menentukan titik awal kurva, titik kontrol kedua menentukan titik tengah kurva, dan titik kontrol ketiga menentukan titik akhir kurva.

$$B(t) = (1 - t)^2 P_0 + 2(1 - t)t P_1 + t^2 P_2, 0 \leq t \leq 1 \dots \dots \dots (2.7)$$

Kurva ini digunakan untuk menggambarkan kurva yang lebih halus, seperti lengkungan atau garis lengkung, dan memberikan lebih banyak fleksibilitas dalam mendefinisikan bentuk kurva, contoh gambar dari kurva kuadratik dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2.7** Contoh Kurva *Bezier* Kuadratik

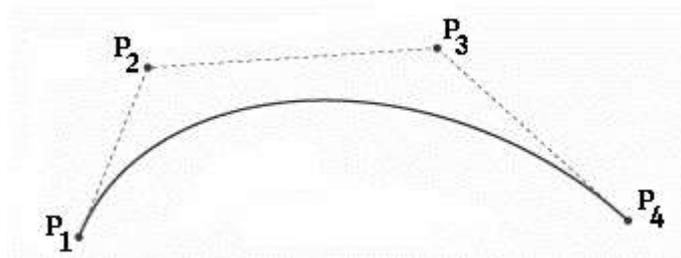
(Sumber: medium.com)

Kurva *Bezier* Kubik atau derajat tiga memiliki empat titik kontrol. Titik kontrol pertama menentukan titik awal kurva, titik kontrol kedua menentukan titik kontrol pertama, titik kontrol ketiga menentukan titik kontrol kedua, dan titik kontrol keempat menentukan titik akhir kurva. Kurva ini sangat fleksibel dan dapat digunakan untuk menggambarkan berbagai bentuk bebas yang kompleks. Kelebihan kurva *Bezier* derajat tiga adalah orde tinggi yang

digunakan dalam persamaannya, yang menghasilkan kurva yang sangat halus. Persamaannya adalah (Riškus, 2006)

$$B(t) = (1 - t)^3 P_1 + 3t(1 - t)^2 P_2 + 3t^2(1 - t) P_3 + t^3 P_4 \dots (2.8)$$

Persamaan *Bezier* adalah persamaan parametrik dalam variabel  $t$  dan bersifat simetris terhadap  $x$  dan  $y$ . Parameter  $t$ , yang bervariasi dalam interval  $[0, 1]$ , memotong segmen  $P_1$ - $P_4$  menjadi interval, sesuai dengan akurasi yang diinginkan. Ketika  $t = 0$ , hasilnya adalah  $B(0) = P_1$ . Untuk  $t = 1$ , hasilnya adalah  $B(1) = P_4$ , geometri contoh dari kurva kubik dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2.8** Kurva *Bezier* Kubik

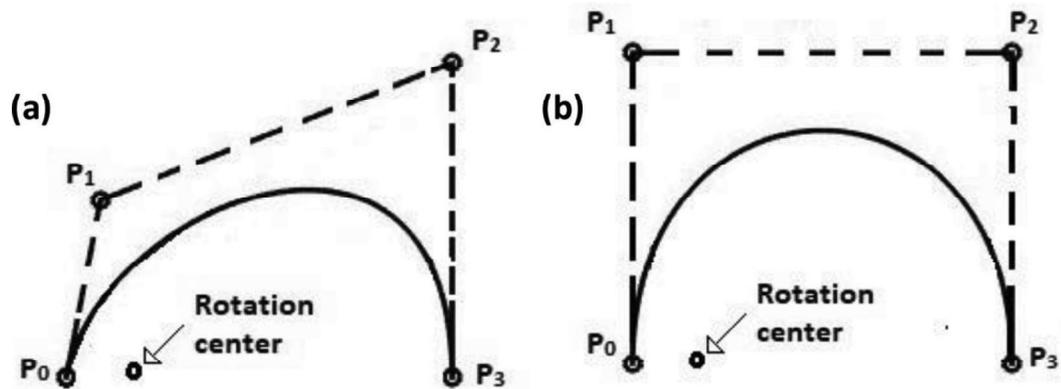
(Sumber: Riskus, 2006)

Dalam penggunaan praktis, kurva *Bezier* derajat 2 dan 3 sering digunakan dalam perangkat lunak desain grafis dan pemodelan 2D dan 3D. Mereka memberikan desainer alat yang kuat untuk menciptakan kurva yang beragam dan bentuk yang kompleks.

Penelitian (Zemamou et al., 2020) yang melibatkan bilah gabungan dengan sisi cekung elips dan sisi cembung konvensional, menghasilkan peningkatan koefisien daya sebesar 11% dan 5.5% dibandingkan dengan bilah konvensional dan bilah elips. yang mengoptimalkan ketebalan, sisi cekung, dan sisi cembung secara terpisah, meningkatkan koefisien daya maksimum sekitar 15%. Penelitian ini juga mengeksplorasi pengaruh kepenuhan bilah pada turbin angin Savonius berbilah dua, yang menghasilkan koefisien daya maksimum 0.573, meningkat 10.98% dibandingkan dengan SWT konvensional.

Dalam konteks ini, pengembangan turbin angin Savonius yang dimodifikasi dengan menggunakan *Bezier Curve* menunjukkan peningkatan

torsi. Model-model yang dihasilkan menunjukkan koefisien daya lebih tinggi dibandingkan dengan model konvensional SWT, dengan koefisien daya tertinggi mencapai 0.35, mencerminkan peningkatan sebesar 29% dibandingkan dengan model konvensional, percobaan ini dilakukan dengan konsep energi angin, namun penelitian kali ini, akan melakukan menggunakan energi arus laut, khususnya pada Selat Sunda, dengan geometri yang sama yang dilakukan penelitian sebelumnya, dengan dimensi yang disesuaikan kembali dengan rotor arus laut untuk Selat Sunda, bentuk dari geometri tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2.9** (a) Savonius *Bezier Curve* (b) Savonius Konvensional

(Sumber: Zemamou et al., 2020)

## 2.5 *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

*Computational Fluid Dynamics (CFD)* adalah sebuah metode analisis sistem yang secara holistik memperhatikan fenomena seputar aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena terkait lainnya, termasuk reaksi kimia, melalui simulasi berbasis komputer yang menggunakan pendekatan numerik (Akmal, 2019)

Sejarah *Computational Fluid Dynamics (CFD)* merentang dari periode tahun 1960 hingga 1970, di mana konsep awalnya lebih fokus pada penerapan CFD dalam reaksi kimia. Namun, seiring berjalannya waktu dan perkembangan teknologi, aplikasi CFD meluas ke berbagai bidang lainnya. Salah satu contoh nyata perkembangan ini adalah penerapan CFD dalam

aplikasi *Computer-Aided Design* (CAD), di mana konsep CFD digunakan untuk menganalisis stres pada desain yang sedang dikembangkan.

Penggunaan CFD di dunia industri sendiri menjadi lebih menonjol pada sekitar tahun 1990-an, khususnya dalam industri penerbangan. Pada periode ini, kemampuan CFD untuk memodelkan dan menganalisis aliran fluida di sekitar objek aerodinamis menjadi kritis untuk perancangan pesawat dan optimalisasi kinerja aerodinamisnya. Sejak saat itu, CFD terus berkembang pesat, mengintegrasikan kemajuan teknologi dan metodologi numerik, dan menjadi alat yang sangat penting dalam berbagai industri, termasuk otomotif, energi, dan manufaktur. Penerapan CFD dalam berbagai aspek desain dan analisis telah memungkinkan pengembangan produk yang lebih efisien, andal, dan inovatif.

Dalam CFD, penghitungan dilakukan melalui kontrol-kontrol tertentu yang membentuk suatu kerangka pembagian ruang, yang dikenal sebagai *meshing*. Pada setiap titik kontrol ini, aplikasi CFD akan melakukan perhitungan dengan mematuhi batasan domain dan kondisi tepi yang telah ditentukan sebelumnya. Prinsip ini merupakan dasar yang umumnya digunakan dalam proses perhitungan dengan bantuan komputasi komputer.

*Meshing* ini adalah proses membagi objek besar menjadi bagian-bagian kecil yang disebut "*mesh*" agar lebih mudah dianalisis atau dimanipulasi. Ini penting dalam dunia komputasi, seperti dalam simulasi fluida atau analisis struktur, di mana memecah objek memungkinkan perhitungan yang lebih akurat dan efisien pada setiap bagian. Semakin rapat *mesh* tersebut, maka semakin banyak jumlah cell tersebut, sehingga semakin akurat. Dan juga ada *Non-orthogonality* yaitu ketidaksesuaian sudut antara dua vektor pada titik-titik tetangga dalam *mesh*. Ini terjadi ketika garis yang menghubungkan pusat dua sel tidak tegak lurus secara sempurna. Ketidaksesuaian ini dapat mempengaruhi perhitungan yang melibatkan penyebaran, seperti penyebaran panas atau cairan dalam simulasi, Dengan kata lain, semakin besar ketidaksesuaian sudutnya, semakin besar pengaruhnya terhadap akurasi perhitungan (Aqilah et al., 2018).