

BAB II

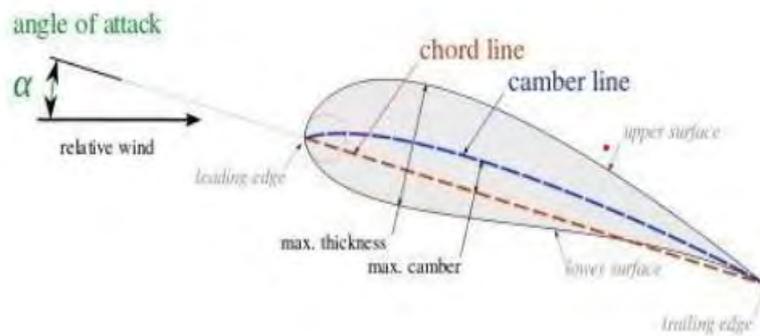
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Airfoil

Sudu/*blade* adalah salah satu bagian signifikan pada sistem turbin angin karena menjadi bagian yang langsung bersentuhan dengan aliran angin. Pada turbin angin dengan sumbu horizontal, memiliki sudu/baling-baling yang biasanya berbentuk *airfoil* dengan bentuk mirip sayap/*wing* pada pesawat. *Airfoil* merupakan sebuah geometri yang ketika diberikan/dikenakan aliran fluida akan menghasilkan *lift force* (gaya angkat) yang lebih besar daripada *drag force* (gaya hambat). (Hidayat, M. F. 2016 dan Kewas, J. C, 2020). Terdapat beberapa bagian pada *airfoil* berikut rinciannya :

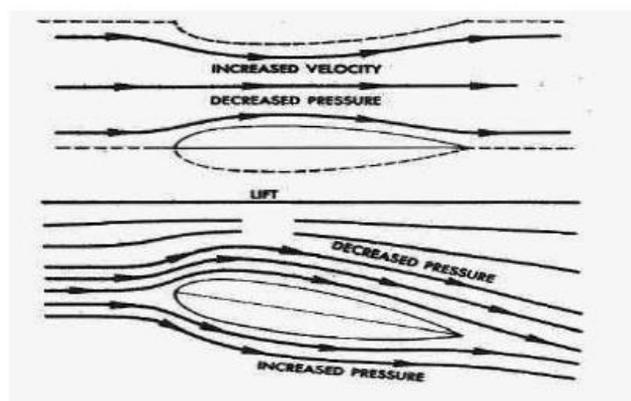
1. *Leading edge*, yang merupakan bagian terdepan pada sebuah *airfoil*.
2. *Trailing edge*, yang merupakan bagian paling belakang dari *airfoil*.
3. *Chamber line*, yaitu garis membagi bagian atas dan bawah *airfoil* sama besar.
4. *Chord line*, garis lurus penghubung *leading edge* dan *trailing edge*.
5. *Maximum chamber*, yang menandakan jarak maksimum antara *chamber line* dan *chord line* (diukur dari *leading edge* disajikan dalam bentuk presentase *chord*)
6. *Maximum thickness*, merupakan jarak maksimum antara bagian (permukaan) atas dan bagian bawah *airfoil* diukur dari sudut tegak lurus terhadap *chord line*.

Berikut gambar yang menunjukkan bagian-bagian *airfoil*.



Gambar 2.1 Bagian-Bagian Sudu/*Blade airfoil*
(Kewas, J. C, 2020)

Pada bagian *upper surface airfoil* memiliki dimensi yang lebih Panjang daripada dimensi pada bagian *lower surface* dimana kecepatan pada *upper surface* lebih tinggi bila dibandingkan dengan *lower surface*. Hal ini mengakibatkan tekanan pada bagian atas lebih rendah daripada bagian bawah yang menyebabkan munculnya gaya angkat (*lift*) pada *airfoil*. Seorang saintis dari swiss Bernama Daniel Bernaulli menyebutkan bahwa tekanan dari sebuah fluida bergerak, yang dapat berupa cairan dan gas, selalu berubah mengikuti kecepatan dari aliran fluida.



Gambar 2.2 Penerapan Teori Bernoulli Pada *Airfoil*
(Saputra, A., 2020)

Secara matematis, persamaan Bernoulli untuk fluida *incompressible* (tidak termampatkan) dapat diberikan sebagai berikut :

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2 + \rho g h_2 \quad (2.1)$$

Yang umumnya dapat pula dinyatakan sebagai :

$$P + \frac{1}{2}\rho V + \rho g h = \text{Konstan} \quad (2.2)$$

Keterangan :

P = Tekanan udara (N/m^2)

ρ = Densitas udara (Kg/m^3)

V = Kecepatan udara (m/s)

h = Ketinggian (m)

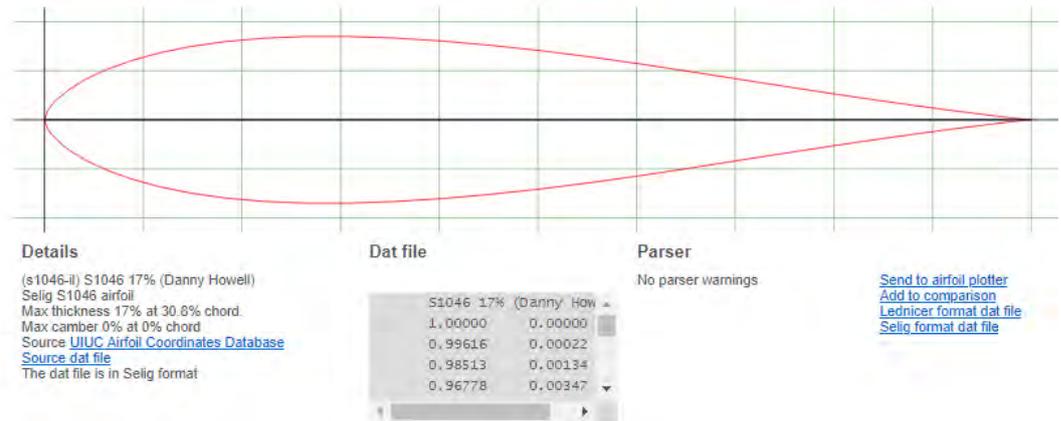
g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

2.2 NACA S1046

Airfoil NACA merupakan *airfoil* yang dikembangkan oleh *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA). Pengembangan *airfoil* yang dilakukan oleh NACA lebih sistematis karena membagi pengaruh efek kelengkungan dan distribusi ketebalan serta pengujiannya dilakukan pada bilangan Reynold yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang lain. *Airfoil* yang dikembangkan NACA dibagi berdasarkan jumlah digit, yang salah satunya dipakai pada penelitian kali ini adalah seri empat digit. Rincian dari tiap digit yang tertera pada jenis NACA adalah, digit pertama berarti nilai (dalam satuan perseratus/persen) maksimum *chamber* terhadap *chord*. Digit kedua menyatakan posisi *chamber* pada *chord* dari *leading edge* (dalam satuan persepuluh). Dua digit terakhir berarti perseratus/persen ketebalan *airfoil* terhadap *chord*. Apabila pada dua digit pertama menunjukkan angka 00, ini berarti *airfoil* tidak memiliki *chamber* atau termasuk *airfoil* simetris.

Salah satu contohnya NACA S1046. Digit pertama yaitu angka 1 menandakan 0,01 dari *chord* atau dapat dituliskan dengan 0,01c dapat disebut juga menunjukkan ketebalan maksimum dari *chamber*. Digit kedua pada angka 0 menunjukkan bahwa *maximum chamber* terletak 0c dari *leading edge*. Untuk dua digit terakhir, 46 atau 0,46c menandakan ketebalan maksimum *airfoil*, jarak

maksimal antara bagian (permukaan) atas dan bagian bawah (Erlangga, G. P. 2017).



Gambar 2.3 NACA S 1046

(Sumber: airfoiltools.com)

2.3 Fluida

Berdasarkan pergerakan partikelnya, aliran fluida dibedakan menjadi aliran laminar dan turbulen. Aliran laminar merupakan aliran fluida yang bergerak dengan kondisi lapisan lapisan (lamina-lamina) yang membentuk garis-garis alir dan tidak berpotongan satu sama lain. Aliran turbulen adalah aliran fluida yang partikel-partikelnya bergerak secara acak dan tidak stabil dengan kecepatan berfluktuasi yang saling interaksi. Akibat dari hal itu maka garis alir antar partikel fluidanya akan saling berpotongan. Untuk menentukan aliran fluida tersebut aliran laminar ataupun aliran turbulen dapat dilihat dari nilai bilangan reynold-nya, pada externalflow (aliran tersebut melewati suatu contour body yang berada pada aliran fluida tanpa batas), pada aliran laminar bilangan reynold-nya $\leq 5 \times 10^5$, dan pada aliran turbulen bilangan reynold-nya $> 5 \times 10^5$. Kemudian aliran fluida diklasifikasikan berdasarkan perubahan terhadap waktu yaitu aliran tunak (steady flow) dan aliran tak tunak (unsteady flow). Aliran tunak (steady flow) terjadi jika kondisi fluida pada titik manapun tidak terjadi perubahan kecepatan terhadap waktu dengan jangka waktu yang tidak terbatas dan dapat dinotasika dengan $\partial v / \partial t = 0$, apabila pada kondisi

kecepatan aliran berubah terhadap waktu $\partial v/\partial t \neq 0$, maka aliran tersebut digolongkan menjadi aliran tak tunak (unsteady flow) (Kewas, J. C, 2020).

Udara adalah suatu zat yang memiliki densitas dan viskositas. Densitas tergantung pada tekanan (P) dan temperature (T). Pada umumnya kendaraan di jalan melaju dengan kecepatan dibawah sepertiga kecepatan suara. Pada batas kecepatan tersebut harga variasi tekanan dan temperatur dalam aliran dengan harga freestream sangat kecil, oleh karena itu perubahan pada densitas dapat diabaikan. Dengan demikian aliran fluida berupa udara yang mengalir di sekeliling kendaraan dapat dikategorikan sebagai aliran fluida incompressible. Properti lain dari udara adalah viskositas. Properti ini dikarenakan oleh gesekan molekuler antar partikel-partikel fluida. Gesekan ini berhubungan dengan fluks momentum, karena adanya gradient kecepatan. Untuk fluida incompressible, property ini bergantung pada temperatur. Viskositas yang dimiliki fluida ini dapat menyebabkan terjadinya friction drag sehingga timbul gradien kecepatan pada dinding (Kewas, J. C, 2020).

Dalam penelitian kali ini, fluida yang berperan adalah angin (udara yang bergerak) sebagai salah satu variasi (yaitu kecepatannya) pengujian *airfoil*. Berdasarkan Penelitian milik Dida P. Wilayah perairan Indonesia memiliki kecepatan angin yang cukup besar dengan kecepatan minimum 6 m/s dan maksimum 12 m/s (Hero P. Dida, 2016). Untuk daerah Banten, berdasarkan penelitian milik Anggi S., kisaran kecepatan angin di daerah Merak, Banten bervariasi, yaitu antara 2,5 m/s sampai 8,2 m/s (Anggi S., 2016). Kemudian mengacu pada alat terowongan angin yang ada di Laboratorium Rekayasa Energi Baru Terbarukan, untuk pengujian eksperimen, hasil visualisasi aliran angin yang baik di dapat pada kecepatan 1 sampai 3 m/s. Maka dari itu, berdasarkan pertimbangan-pertimbangan di atas, diputuskan untuk menggunakan variasi kecepatan angin dari 1 sampai 5 m/s.

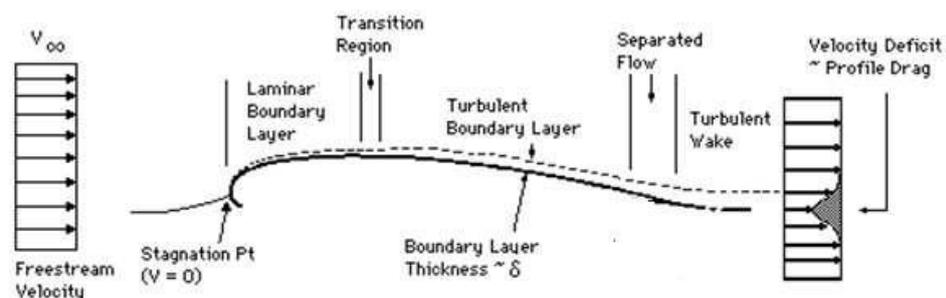
2.4 Boundary layer

Sebuah aliran yang melewati suatu *contour body* pada sebuah aliran fluida tanpa ada batas dapat disebut sebagai aliran eksternal (*eksternal flow*).

Boundary layer (lapis batas) merupakan lapisan tipis pada solid surface yang terbatas daerah sangat sempit dekat permukaan kontur dengan kecepatan fluida tidak uniform dikarenakan tegangan geser yang muncul akibat viskositas (Hasugian, T. D. 2018).

Berdasarkan karakteristiknya, *boundary layer* digolongkan menjadi *boundary layer* laminar dan turbulen. Umumnya klasifikasi ini bergantung pada gangguan-gangguan yang dapat dialami oleh suatu aliran yang mempengaruhi gerak dari partikel-partikel fluida tersebut. Apabila aliran mempunyai kecepatan relatif rendah atau fluidanya sangat *viscous*, gangguan yang mungkin dialami oleh medan aliran akibat getaran, ketidakrataan permukaan batas, dan sebagainya relatif cepat teredam oleh viskositas fluida tersebut maka *boundary layer* digolongkan sebagai *boundary layer* laminar.

Pada *airfoil* tekanan dan kecepatan yang dimiliki oleh aliran berubah di sepanjang permukaan *airfoil*. Pada umumnya pada *leading edge* dari suatu *airfoil*, *boundary layer* yang terbentuk adalah laminar. Seiring dengan pertumbuhan *boundary layer*, akan terjadi peralihan dari *boundary layer* laminar menjadi *boundary layer* turbulen seperti Gambar 2.7 (Wijaya, R. K. 2015).

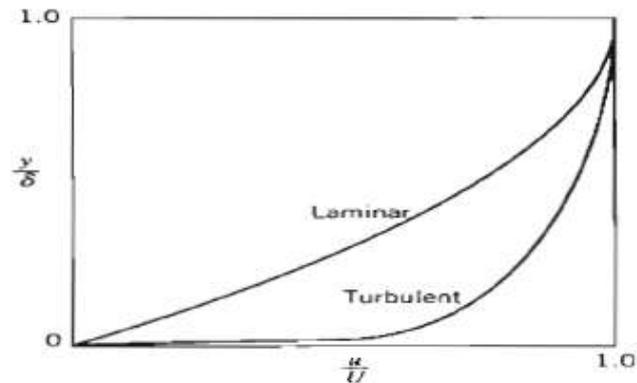


Gambar 2.4 *Boundary Layer*

(Wijaya, R. K. 2015).

Perbedaan dasar antara jenis *boundary layer* laminar dan turbulen adalah Gerakan pada *boundary layer* jenis turbulen lebih efektif untuk mengangkut massa serta momentum fluidanya. Bila diamati secara visual, perbedaan antara *boundary layer* laminar dan turbulen dari profil kecepatan *boundary layer*

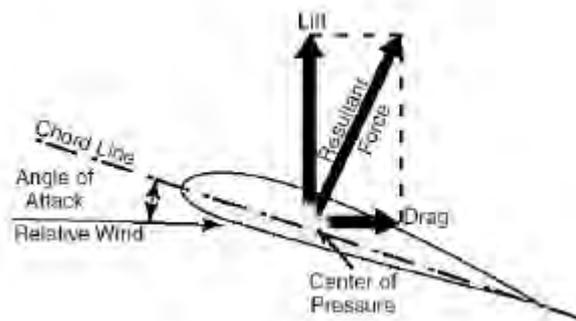
turbulen lebih landai di daerah dekat dinding daripada profil kecepatan *boundary layer* laminar seperti Gambar 2.8 (Wijaya, R. K. 2015).



Gambar 2.5 Profil kecepatan *boundary layer* laminar dan turbulen di dekat permukaan (Wijaya, R. K. 2015).

2.5 Gaya yang Bekerja Pada *Airfoil*

Apabila terdapat sebuah objek bergerak melalui fluida, maka interaksi antara kedua eksistensi akan terjadi. Fenomena yang terjadi dapat dideskripsikan sebagai gaya-gaya pada kontak antar muka fluida dengan benda (objek tersebut). Ketika *airfoil* melalui sebuah fluida, maka gaya yang terjadi adalah gaya angkat (*lift*) dan gaya hambat (*drag*) (Kewas, J. C, 2020)..



Gambar 2.6 Gaya Pada *Airfoil* (Kewas, J. C, 2020).

2.5.1 Gaya Angkat (*lift*)

Gaya angkat adalah resultan gaya mekanik tegak lurus aliran fluida yang ditimbulkan karena interaksi antara permukaan *airfoil* dan fluida, dan dapat juga terjadi karena adanya perbedaan tekanan pada bagian atas dan bawah *airfoil*, saat tekanan pada permukaan bawah *airfoil* lebih besar, maka *airfoil* akan terangkat. Gaya angkat adalah besaran vektor sehingga angka negatif pada gaya angkat menunjukkan arah dari gaya angkat tersebut. Gaya angkat biasanya dilambangkan sebagai L_F (*lift force*). Koefisien angkat adalah nilai yang dipakai untuk memodelkan bentuk, perubahan sudut, dan kecepatan aliran pada gaya angkat. Koefisien gaya angkat juga dipakai sebagai karakteristik dari bentuk tertentu (*cross-section*) dari *airfoil*. Pada aplikasi ini disebut *lift* (C_l) yang menunjukkan hubungan antara koefisien *lift* dan sudut serang pada *airfoil*. Terdapat beberapa hal yang dapat mempengaruhi koefisien gaya angkat (C_l / *Coefficient Lift*), yaitu sudut serang (*angle of attack*), bentuk dan geometri *blade/airfoil*. (Delnero, J.,2007, Erlangga, G. P. 2017, Hasugian, T. D. 2018, Hidayat, M. F. 2016).

Persamaan matematis gaya angkat dapat dituliskan sebagai :

$$L_F = C_l \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (2.3)$$

Atau

$$C_l = \frac{2 L_F}{\rho V^2 A} \quad (2.4)$$

Keterangan :

C_l = koefisien gaya angkat

ρ = densitas udara (kg/m³)

V = kecepatan aliran udara (m/s)

A = luas permukaan (m²)

L_F = Gaya angkat (N)

2.5.2 Gaya Hambat (*drag*)

Gaya hambat dapat terjadi ketika permukaan *airfoil* melakukan kontak dengan aliran fluida dan arahnya sejajar dengan aliran udara. Seperti gaya angkat, gaya hambat juga termasuk besaran vektor. Gaya hambat juga bisa disebut sebagai gesekan aerodinamis yang salah satu penyebabnya adalah gesekan antara *airfoil* dengan fluida, makin halus permukaan, maka makin kecil pula gaya hambatnya. Mirip dengan koefisien angkat, koefisien hambat juga merupakan nilai bilangan yang dapat digunakan untuk memodelkan bentuk, perubahan sudut, dan kecepatan aliran pada gaya hambat. Faktor yang dapat mempengaruhi koefisien hambat adalah densitas udara, luas permukaan *blade*, dan kecepatan fluida. (Erlangga, G. P. 2017, Hasugian, T. D. 2018, Hidayat, M. F. 2016).

Persamaan matematis gaya hambat dapat dituliskan sebagai berikut :

$$D_F = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (2.5)$$

Atau

$$C_D = \frac{2 D_F}{\rho V^2 A} \quad (2.6)$$

Keterangan :

C_D = koefisien gaya hambat

ρ = densitas udara (kg/m³)

V = kecepatan aliran udara (m/s)

A = luas permukaan (m²)

D_F = Gaya hambat (N)

2.5.3 Koefisien Tekanan

Perataan tekanan pada kontur sebuah benda dapat dinyatakan dalam bilangan tanpa dimensi yang disebut koefisien tekanan. Secara matematis koefisien tekanan (C_p) adalah selisih tekanan statis local dan tekanan statis *freestream* dibagi tekanan dinamis. Secara matematis koefisien tekanan dapat dituliskan sebagai :

$$C_P = \frac{P_c - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2.7)$$

Keterangan :

C_P = koefisien Tekanan

P_c = Tekanan statis local pada kontur

P_∞ = Tekanan statis aliran bebas

ρ = Massa jenis fluida

U = Kecepatan *freestream*

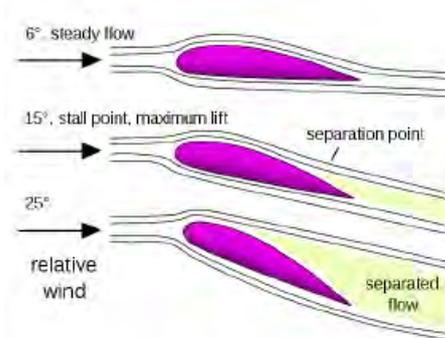
2.6 Sudut Serang

Biasa juga disebut sebagai *angle of attack*, sudut serang adalah sudut yang terbentuk antara *chord line* terhadap arah datangnya aliran udara, makin besar sudut serang maka gaya aerodinamik yang bekerja akan makin besar pula. Apabila *airfoil* simetris memiliki sudut serang 0° maka gaya angkat yang dihasilkan akan sebesar 0 pula, tidak seperti *airfoil* asimetris, meski sudut serang 0° , gaya angkat akan tetap ada.

Pada sebuah sudut serangan kritis tertentu, aliran disekitar *airfoil* akan terurai dan mengalami fenomena yang disebut *stall*. Mengecilkan nilai kecepatan udara saat melewati *blade* akan menimbulkan tekanan yang berlawanan pada daerah *downstream airfoil* sehingga dapat terjadi separasi aliran besar-besaran yang akan menyebabkan fenomena *stall*. Menurut dinamika fluida, *stall* adalah penurunan gaya angkat akibat bertambahnya sudut serang sehingga mempengaruhi arah aliran fluida yang juga menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan yang besar pada bagian atas dan bawah *blade/wing* dan dapat mempengaruhi gaya angkat. Fenomena ini biasanya terjadi saat sudut *airfoil* melampaui sudut kritis, biasanya sekitar 15° . Namun hal tersebut dapat bervariasi signifikan tergantung pada sifat/property fluida, bilangan Reynolds dan bentuk/geometri *airfoil* (Hasugian, T. D. 2018).

Sudut serang kritis sendiri merupakan sudut serang yang dapat menyebabkan nilai koefisien angkat menjadi maksimal. Separasi aliran mulai terjadi pada sudut serang kecil sementara aliran yang melekat pada bagian atas *airfoil* masih melekat. Ketika terjadi penambahan sudut serang, akan terjadi

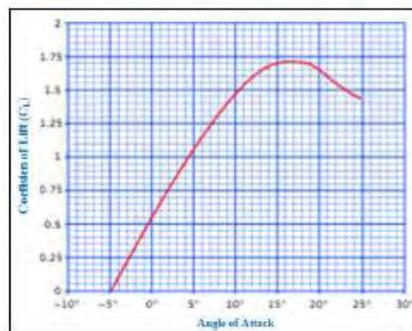
pemisahan daerah fluida yang dapat menghambat kemampuan *airfoil* untuk menciptakan daya angkat (Kewas, J. C., M. 2020).



Gambar 2.7 Sudut Serang Kritis

(Kewas, J. C., M. 2020).

Relasi antara gaya angkat dan koefisien angkat pada *airfoil* dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.8 Grafik Relasi Antara Koefisien Gaya Angkat Terhadap Sudut Serang

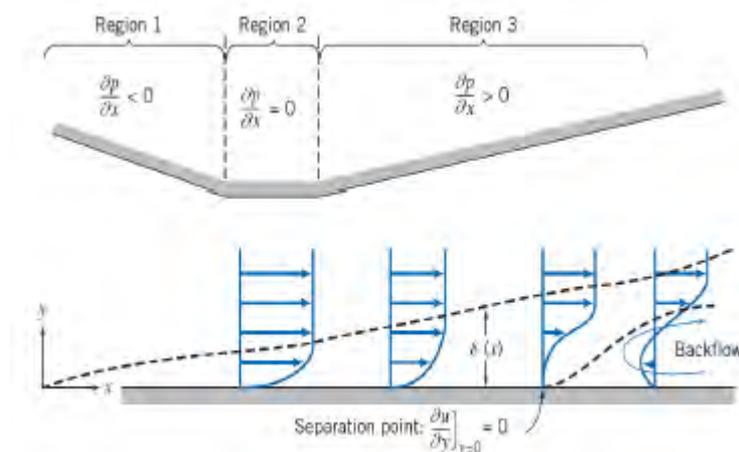
(Kewas, J. C., M. 2020).

2.7 Separasi Aliran

Separasi merupakan peristiwa dimana aliran fluida terpisah dari permukaan benda. menyebabkan terjadinya *boundary layer* yang terpelintir biasanya disebut sebagai *skewed boundary layer*. Aliran sekunder disebabkan oleh ketidak mampuan aliran utama khusus daerah aliran viscous melawan *adverse pressure* dari bodi. *Flow separation* dibagi menjadi dua jenis yaitu separasi

aliran 2D dan separasi aliran 3D, penyebab keduanya tidaklah sama. Separasi aliran dimulai dengan ditandai dengan tidak adanya perubahan kecepatan fluida (u) menuju arah sumbu x didekat dinding $\left[\frac{du}{dy}\right]_{y=0} = 0$

Dapat dilihat pada gambar berikut, dimana separasi aliran terjadi karena adanya fluida yang mengalami pergerakan fluktuasi yang disebabkan gaya gesek. Gaya gesek tersebut dapat mengurangi momentum pada aliran sampai momentum tersebut tidak dapat mengatasi hambatan sehingga aliran fluida akan terpisah dari permukaan benda. Pada titik dimana separasi terjadi, *gradient* tekanan pada permukaan bodi adalah nol dan aliran fluida di belakang titik separasi arahnya berlawanan dengan aliran utama (Sutrisno, 2017)

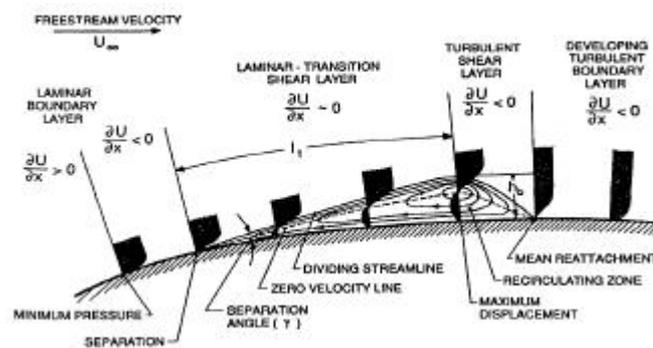


Gambar 2.9 *Boundary layer flow* dengan *pressure gradient* (Sutrisno, 2017)

Separasi aliran 2D adalah fenomena yang terjadi ketika aliran meninggalkan bidang *viscous* akibat *adverse pressure* dan efek friksi. Aliran separasi 2D terjadi pada aliran laminar dimana aliran tidak mampu mengatasi efek kumulatif dari *adverse pressure gradient* dan *wall stress* akibat momentum aliran yang kecil, sedangkan aliran separation 3D merupakan interaksi dua aliran *viscous* yang saling berdekatan sehingga aliran 3D selalu terjadi di daerah persimpangan atau *junction*.

Selama berlangsungnya separasi maka muncul interaksi antara aliran *nonviscous* dengan lapisan batas aliran terseparasi, peristiwa ini biasanya

disebut *entrainment*. Dampak tersebut memungkinkan aliran pulih kembali apabila jumlah komulatif energi momentum telah mampu mengatasi *adverse pressure gradient* sehingga aliran kembali bergerak kembali menuju permukaan gesekan yang disebut dengan *reattachment*. Peristiwa ini biasanya disebut dengan *bubble separation*. Pada proses resirkulasi ini terjadi perubahan karakteristik aliran dari aliran laminar menuju turbulen yang lebih singkat. Berikut gambaran fenomena separasi aliran (Sutrisno, 2017).



Gambar 2.10 Fenomena *Bubble Separation*

(Sutrisno, 2017)

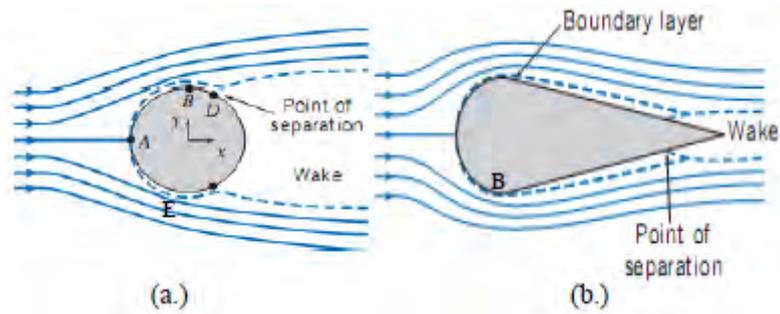
Aliran sekunder selalu diawali dengan terbentuk *saddle point*. Pada titik *saddle* terjadi peristiwa bertemunya dua *attachment line* dari *attachment line primer* dan *attachment line from leading edge*. Interaksi aliran di *saddle point* dihasilkan *separation 3D line* yang arahnya selalu *orthogonal* dengan aliran primer (Sutrisno, 2017).

2.7.1 Separasi Aliran 2D

Separasi aliran 2D dapat merugikan bagi aliran laminar atau aliran dengan kondisi parallel. Aliran laminar dua dimensi tersebut akan dikacaukan oleh efek gesekan dan oleh *adverse pressure gradient* pada permukaan objek yang dilalui.

Vorticity yang terjadi pada titik ini sangat besar sehingga momentum yang ada mulai dirusak *vorticity* tersebut dan terjadilah *vortex*. *Vortex* merupakan daerah di belakang daerah separasi. Ada dua daerah yang ada pada daerah separasi ini yaitu daerah *laminar*

yang terseparasi dan daerah resirkulasi. Daerah separasi tersebut semakin ke belakang semakin besar sampai pada suatu titik dimana alirannya sudah kembali ke kondisi paralel (alirannya sudah paralel), dan hal ini dikenal dengan *reattachment*. Pada titik ini momentum yang terdapat di dalam aliran fluida ini sudah dapat mengatasi *adverse pressure gradient* yang terjadi sebelumnya atau dengan kata lain momentumnya sudah mendapatkan tambahan kembali dari kondisi *freestream*-nya. Namun aliran ini sudah berubah menjadi aliran yang *turbulen* karena penambahan momentum yang ada tersebut melebihi dari kondisi *laminar*-nya. Pada titik ini momentum yang terdapat di dalam aliran fluida ini sudah dapat mengatasi *adverse pressure gradient* yang terjadi sebelumnya atau dengan kata lain momentumnya sudah mendapatkan tambahan kembali dari kondisi *freestream*-nya. Namun aliran ini sudah berubah menjadi aliran yang *turbulen* karena penambahan momentum yang ada tersebut melebihi dari kondisi *laminar*-nya. Aliran yang *turbulen* ini baik sekali untuk mengatasi *adverse pressure gradient*. Pada gambar 2.12 (a.) dibawah, kecepatan yang mengelilingi silinder meningkat sampai suatu titik maksimum D dan kemudian berkurang saat bergerak lebih jauh kebelakang dari titik D. Titik D disebut titik separasi (*separation point*), dimana partikel fluida mendorong objek dan menyebabkan terjadinya *wake*. Pada suatu aliran *inviscid* peningkatan distribusi kecepatan dihubungkan oleh pengurangan distribusi tekanan pada aliran yang melintasi profil silinder tersebut. Sehingga pada suatu aliran *incompressible inviscid flow* yang melintasi silinder, distribusi tekanan disepanjang permukaan dari silinder berkurang saat berjalan dari A-D dan akan meningkat lagi saat bergerak dari DE. Pada aliran *viscous steady incompressible* bentuk aliran akan tampak seperti pada gambar 2.12 berikut ini : (Hasugian, T. D. 2018).



Gambar 2.11 (a.) Aliran *incompressible* melewati bola (*sphere*)

(b.) Separasi aliran melewati benda *streamline*

(Hasugian, T. D. 2018).

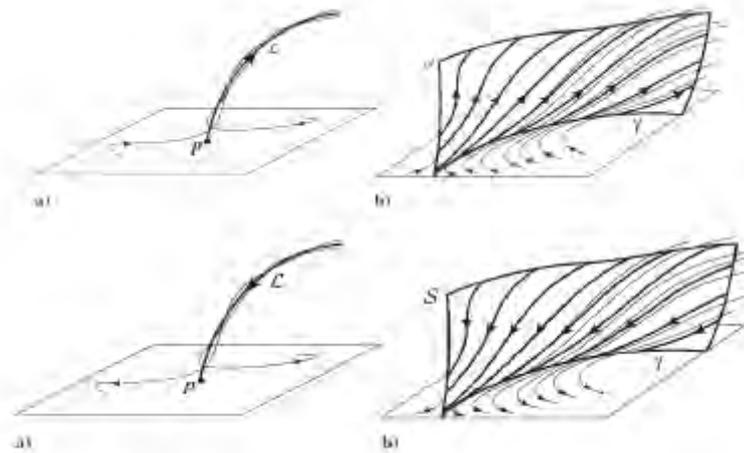
Pada gambar 2.12 (b.) bagaimana bentuk streamline bekerja. Gaya drag pada kebanyakan aerodinamik karena tekanan rendah pada *wake*: jika *wake* dapat dikurangi atau dihapus, drag akan dapat banyak dikurangi. Jika kita membuat bola menyerupai bentuk air mata pada gambar 2.12(b.) streamline terbuka, dan tekanan akan meningkat dengan pelan, seperti memperpanjang aliran sehingga partikel aliran tidak didorong untuk memisahkan dari objek sampai mencapai akhir dari objek. *Wake* yang terjadi lebih kecil, sehingga mengurangi tekanan drag. Hanya satu aspek negatif dari *streamline* ini adalah luas permukaan total dengan gesekan terjadi lebih besar, sehingga *drag* karena gesekan akan sedikit berkurang. Namun pada aliran setelah titik B tekanan akan meningkat dalam arah aliran sehingga pada beberapa titik momentum aliran dari fluida didalam *boundary layer* tidak cukup untuk membawa elemen jauh kedalam daerah peningkatan tekanan sehingga aliran fluida yang berdekatan pada permukaan akan mengalami pemecahan ke arah balik dan aliran akan terseparasi dari permukaan. Hasil dari separasi *boundary layer* pada daerah *relative* tekanan rendah dibelakang body yang mana momentum alirannya tidak mencukupi disebut *wake* (Hasugian, T. D. 2018).

2.7.2 Separasi Aliran 3D

Aliran separasi 3D atau aliran sekunder merupakan paparan sebuah domain pergerakan fluida yang diungkapkan melalui *wall streamline display* yang pertama kali diungkap oleh kalangan praktisi. Aliran sekunder pertama kali diketahui melalui observasi gambar yang didapatkan dengan teknik *oil flow visualization* pada permukaan hasil dari eksperimen *wind tunnel*. Kemudian aliran sekunder pertama kali dianalisis dalam bentuk jurnal yang dilakukan berdasarkan garis-garis *skin friction* pada permukaan bidang tumpu. Hipotesis ini didasari bahwa garis *skin friction* dapat dijadikan pengamatan pergerakan vektor pada permukaan lintasan aliran yang disebut sebagai *wall streamline*. Separasi aliran berasal dari pertemuan *streamline* dinding tertentu berasal dari sebuah *singular point* yaitu *saddle point*.

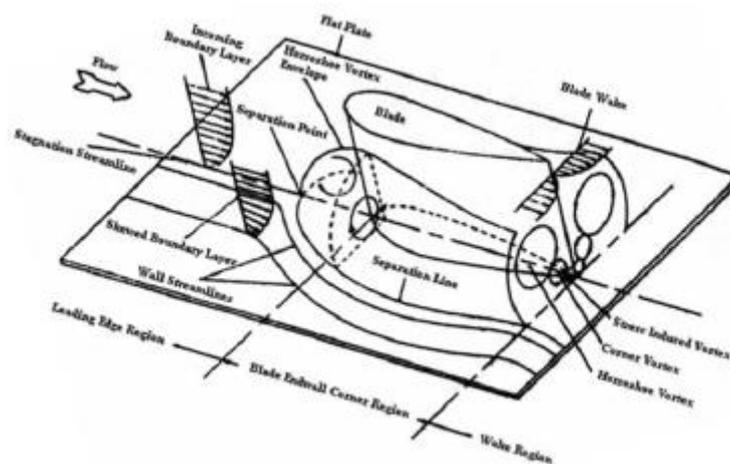
Kondisi suatu titik antara *skin friction* berupa *wall shear stress* dengan *vorticity* yang bernilai nol disebut sebagai *singular point*. Titik tersebut diklasifikasikan berdasarkan vektor menjadi *nodal* atau *node*, *spiral nodal* dan *saddle*. *Node* diklasifikasi menjadi *separation line* dan *attachment line* berdasarkan arah vektor kecepatan. Dimana garis *node* yang memiliki arah meninggalkan titik singular disebut sebagai *separation line* sedangkan yang memiliki arah menuju titik singular disebut sebagai *attachment line*. Sedangkan untuk *Spiral Node* atau *foci* atau *focus* merupakan kondisi tidak ditemukan garis tangensial vektor kecepatan sehingga aliran terbentuk terjadi pusaran *vortex*. *Focus* dibedakan menjadi dua jenis seperti peristiwa *node*. Sedangkan untuk *saddle point* merupakan pertemuan dua *particular line* masuk di suatu titik yang menghasilkan dua *particular line* yang keluar.

Separation line merupakan partikel fluida mulai berkumpul tertutup menuju *boundary converge* pada sebuah *streamline*, kemudian aliran tersebut meninggalkan *boundary*. Sedangkan untuk *attachment line* berkebalikan dari *separation line* (Sutrisno, 2017)



Gambar 2.12 Perbedaan *Separation Line* dan *Attachment Line*
(Sutrisno, 2017)

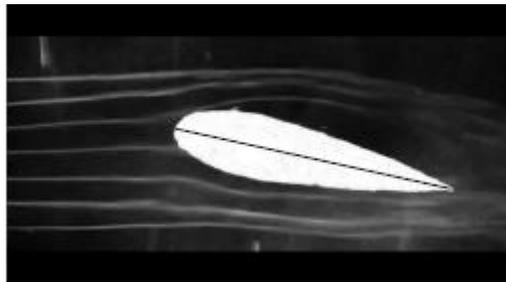
Pada penelitian yang melakukan pendalaman secara eksperimen terhadap *airfoil* tunggal NACA 65-15 dan plat datar dan digunakan kecepatan 27,3 m/s terbentuk aliran sekunder seperti *horseshoe vortex* melewati interaksi *airfoil* dan plat datar, seperti pada gambar berikut (Sutrisno, 2017).



Gambar 2.13 Separasi Aliran Dengan Bentuk *Horseshoe*
(Sutrisno, 2017)

Pada penelitian ini dihasilkan visualisasi aliran di permukaan plat datar diperlihatkan *single horseshoe vortex* dengan nilai yang tinggi antara *leading edge* dan titik ketebalan maksimum (*maximum thickness*). Bentuk ukuran *vortex* tergantung dari bentuk profil *blade leading edge* dan tebal lapisan batas. Jarak antara permukaan sudu dengan *limiting streamline* ke arah transversal (sumbu Y) mempunyai nilai maksimum pada lokasi titik ketebalan maksimum.

Pada penelitian sebelumnya, oleh Arief Mukhsin, telah dilakukan eksperimen simulasi aliran fluida dengan perantara *smoke* pada *wind tunnel* yang bertujuan untuk mengetahui bentuk aliran, dengan subjek yang digunakan adalah *airfoil* jenis NACA S1046. Pada penelitian tersebut, terlihat dalam visualisasi alirannya, terjadi separasi aliran pada *airfoil* pada sudut serang 7° yang dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.14 Pengaruh α terhadap aliran sekunder
(Mukhlisin, A., 2022)

Berdasarkan visualisasi pada eksperimen tersebut akan dilakukan perancangan *turbulator* dan pengujiannya menggunakan simulasi CFD dengan *software* Ansys *Fluent*.

2.8 Turbulator (*turbulence generator*)

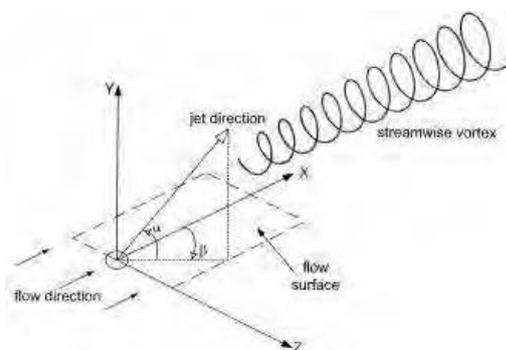
Pada salah satu penelitian sebelumnya juga dinyatakan bahwa pada *boundary layer* aliran yang lebih turbulen (*high turbulent intensity*) selalu menghasilkan momentum yang lebih *fuller* sehingga lebih kuat momentumnya di daerah dekat permukaan bidang gesekan. Semakin turbulen sebuah aliran

semakin *fuller*. Profil kecepatan pada aliran turbulen memiliki *disturbance thickness* yang semakin tebal, namun momentum aliran didekat dinding sangat besar dibandingkan dengan aliran laminar.

Berdasarkan bilangan *Reynolds* aliran turbulen memiliki komponen fluktuasi kecepatan, semakin besar fluktuasi komponen kecepatan selalu diindentitaskan dengan aliran yang semakin turbulen. Oleh karena itu aliran yang semakin turbulen walaupun kecepatan *freestream* yang sama memiliki momentum kuat di dekat dinding, sehingga aliran yang lebih turbulen lebih mampu menghadapi hambatan friksi dan *adverse pressure*.

Oleh karena itu reduksi terjadinya aliran sekunder dapat dilakukan dengan meningkatkan turbulensi aliran, sehingga aliran dekat dinding lebih mampu menghadapi *adverse pressure*. Upaya peningkatan turbulensi aliran dilakukan melalui penambahan *turbulent generator* (turbulator) pada bidang tumpu.

Turbulen generator atau *vortex generator* merupakan perangkat aerodinamika yang berbentuk menyerupai sirip dimana biasanya *vortex generator* ini diletakkan pada *suction side* atau permukaan atas dari suatu benda seperti pada sayap pesawat atau pada sudu turbin. Ketika benda tersebut bergerak, maka *vortex generator* ini menyebabkan munculnya *vortex* atau olakan akibat adanya *transfer momentum* pada daerah setelah melewati *vortex generator* ini sehingga terjadi transformasi *boundary layer* yang pada mulanya berupa *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer*. Pola aliran setelah melewati *vortex generator* seperti Gambar 2.19.



Gambar 2.15 *Streamwise vortices* pada daerah setelah melewati *vortex generator*

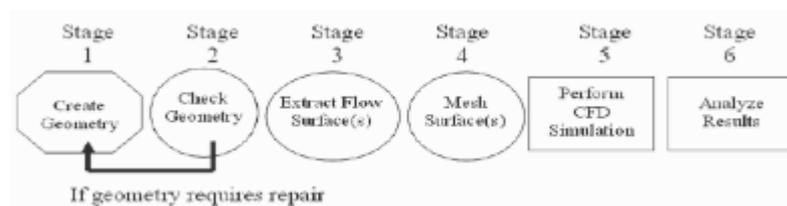
(Wijaya, R. K. 2015)

Bentuk *turbulator* dibagi menjadi beberapa jenis yaitu *groove*, *riblet*, *obstacle*, *blunt/bluff* dan lain-lain. Turbulator yang baik adalah yang dapat mempercepat terjadinya transisi aliran. Maka penulis akan merancang *turbulator* dengan jenis tertentu untuk ditambahkan pada *airfoil* jenis NACA S1046 pada Sultan *Wind Turbine* untuk diuji coba dan dianalisis efeknya dalam mereduksi terjadinya separasi aliran .

2.9 Computer Fluid Dynamic (CFD)

CFD merupakan piranti untuk menganalisis sebuah sistem yang melibatkan fluida, perpindahan energi, panas, momentum, dan fenomena fluida lainnya berbasis simulasi dengan bantuan komputer. Dengan perangkat lunak ini, kita dapat melakukan eksperimen yang berupa simulasi dengan menerapkan sistem dan kondisi nyata yang sesungguhnya. Penggunaan CFD memerlukan pengetahuan dan pemahaman dasar mekanika fluida untuk diterapkan agar dapat melakukan simulasi. Tahap penggunaan CFD terdiri dari tiga tahapan proses pengerjaan, yaitu *preprocessing* (spesifikasi geometri, pemilihan *turbulence model*, spesifikasi *parameter* dan *grid generation*) kemudian *postprocessing* (*visualization* dan *treatment data*).

Pada penelitian kali ini, perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan simulasi CFD adalah Ansys *Fluent 2021* versi *student*. Berikut gambaran tahap-tahap prosedur CFD.



Gambar 2.16 Tahapan prosedur CFD

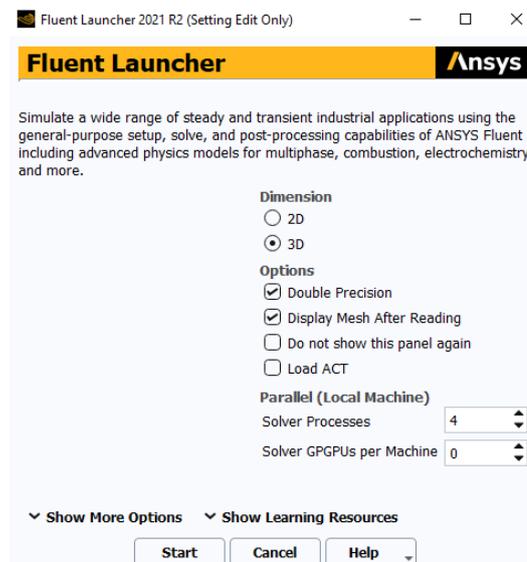
(Hasugian, T. D. 2018)

Fluent adalah jenis program CFD yang menggunakan metode volume terbatas (*finite volume*). *Fluent* menawarkan Fleksibilitas mesh penuh sehingga memungkinkan untuk memecahkan persoalan fluida menggunakan

mesh/jaringan tidak terstruktur (grid) bahkan menggunakan langkah yang paling sederhana sekalipun (Hasugian, T. D. 2018).

2.9.1 Solver

Pada proses simulasi penggunaan fluent selalu memberikan informasi tentang jendela pembuka. Saat pembukaan fluent terdapat pilihan untuk menggunakan solver 2D/3D dengan ketelitian tunggal atau ketelitian ganda (*single precision/double precision(dp)*). Secara umum *solver single precision* cukup akurat untuk digunakan pada berbagai kasus, tetapi untuk beberapa kasus tertentu lebih baik menggunakan *solver double precision*.



Gambar 2.17 Tampilan *Fluent Launcher*

Tahap selanjutnya pemilihan *pressure based* atau *density based*. Sejarahnya *pressure based solver* digunakan untuk pengembangan laju rendah pada *incompressible flow*, sedangkan *density based solver* digunakan pada laju yang tinggi pada aliran *compressible flow*. *Pressure based solver* menggunakan algoritma umum biasanya disebut sebagai metode proyeksi. Pada proses tersebut batasan persamaan kekekalan massa dari medan kecepatan dengan menyelesaikan persamaan tekanan atau sebagai koreksi nilai

tekanan. Persamaan tekanan berasal dari kontinuitas dan persamaan momentum demikian rupa medan aliran, dikoreksi oleh tekanan dan memenuhi kontinuitas. Karena persamaan yang mengatur adalah nonlinier dan digabungkan (*couple*) satu dengan yang lain, proses solusi melibatkan iterasi dimana seluruh masukan *governing equations* diselesaikan berulang kali sampai penyelesaian konverge. Model ini dibagi lagi menjadi dua yaitu *segregated* dan *coupled algorithm*.

Pressure based segregated model menggunakan inisial awal dari momentum (U,V,W) kemudian digunakan untuk menyelesaikan persamaan tekanan dan dikoreksi terhadap kontinuitasnya. Hasil perhitungan tersebut digunakan untuk memperbarui nilai dari fluk massa, tekanan dan kecepatan dalam proses simulasi. Kemudian hasil tiga komponen tersebut digunakan sebagai penyelesaian energi, turbulen dan lainnya, semua hasil ini disirkulasikan pada data *properties*. Sedangkan *pressure based coupled* penyelesaian kekekalan momentum dan tekanan kemudian dikoreksi oleh kontinuitas. Hasil tersebut digunakan untuk perbaruan nilai fluk massa, kemudian dilanjutkan dengan perbaruan nilai energi, spesies, model turbulen dll. Semua hasil tersebut disirkulasikan pada data *properties* (Sutrisno, 2017)

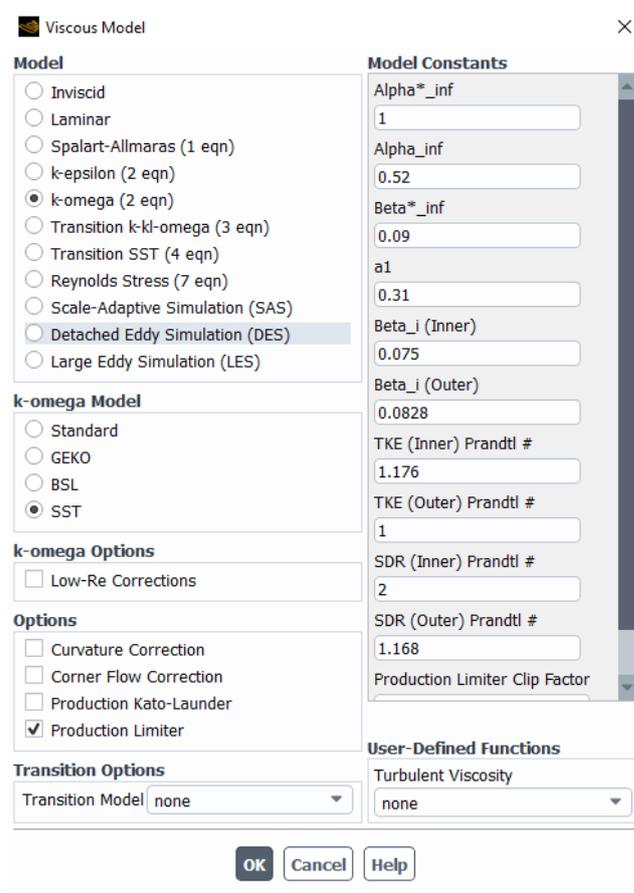
2.9.2 Penentuan Model Turbulen

Pada Ansys *Fluent* terdapat beberapa bentuk dan persamaan fundamental yang dapat disesuaikan dengan kasus analisis yang akan dilakukan. Persamaan-persamaan tersebut meliputi model multifasa, persamaan energi, model viskos, model spesies transport dan reaksi, model fasa diskrit, model pembekuan dan peleburan, dan model akustik.

Secara garis besar, model *turbulen* dapat didekati dengan dua pendekatan, yaitu berdasarkan *Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)* dan berdasarkan *Large Eddy Simulation (LES)*. Kedua

pendekatan tersebut sama-sama memerlukan model dengan besaran yang dirata-ratakan (*time-average, ensemble-average*).

Sebelum menentukan model viskos, harus ditentukan terlebih dahulu apakah aliran fluida yang akan disimulasikan termasuk dalam aliran *laminar* atau *turbulen* dengan menghitung bilangan *Reynolds* terlebih dahulu. Apabila termasuk aliran *turbulen*, maka *CFX* menyediakan beberapa model turbulensi, yaitu model *Spalart - Allmaras*, model *k-epsilon (k - ϵ) Standard*, *k - ϵ Renormalization group (k - ϵ RNG)*, *k - ϵ Realizable*, model *k - ω Standard*, *k- ω Shear Stress Transport (SST)*, model *Reynoldsstress (RSM)*, dan model *Large Eddy Simulation (LES)* khusus 3D (Sutrisno, 2017).



Gambar 2.18 Model Turbulensi Pada Aplikasi *Fluent*

Berdasarkan model-model yang ada, model turbulensi yang akan digunakan adalah model K-Omega SST. Model Standard K

Omega yang terdapat pada FLUENT merupakan model berdasarkan model Wilcox K-Omega. Model ini merupakan modifikasi dari perhitungan efek gesekan pada bilangan Reynolds yang rendah, kompresible dan penyebaran aliran gesekan (*shear flow*). Model ini dapat diaplikasikan pada aliran dalam saluran maupun aliran bebas gesekan (*free shear flow*). Pada model digunakan persamaan pada 2.7 dan 2.8, dimana k merupakan turbulent kinetic energy dan merupakan laju disipasi spesifik (Sutrisno, 2017).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (2.8)$$

Untuk mengkompromikan antara kekurangan model K-Epsilon dan K-Omega, dibutuhkan suatu persamaan baru dimana dapat melakukan switching. Dimana ketika di dekat wall, menggunakan model K-Omega agar dapat mengcapture fenomena near wall dengan akurat. Sebaliknya, ketika jauh dari wall, harus switch ke model K-Epsilon agar hasil simulasi tidak sensitive terhadap nilai freestream. Oleh karena itu, dibutuhkan variable baru F_1 yang berfungsi semacam ‘switch’ untuk beralih dari persamaa K-Epsilon ke K-Omega.

Model K-Omega SST adalah model turbulensi yang digunakan dalam simulasi. Model **k- SST** (Shear Stress Transport) dikembangkan oleh Menter untuk memadukan formulasi model k -omega standar yang stabil dan akurat pada daerah di dekat dinding dengan model k - epsilon yang mempunyai kelebihan pada aliran *free-stream*. Untuk mencapai hal tersebut, model k - epsilon diubah dalam formulasi k - omega. Model k - omega **SST** mirip dengan model standard komega, tetapi dengan beberapa perbaikan, yaitu :

- Model k - omega standar dan model k - epsilon yang telah diubah dikalikan dengan suatu fungsi pencampuran dimana kedua model digunakan bersama-sama, sehingga lebih akurat untuk daerah di dekat dinding maupun aliran yang jauh dari dinding dan *free stream flow*.
- Definisi viskositas turbulen dimodifikasi untuk menghitung transport dari tegangan geser turbulen.
- Konstanta model berbeda dengan model k - omega standar.
- Melibatkan sebuah besaran dari penurunan *damped cross-diffusion* pada persamaan omega (Sutrisno, 2017)