

BAB IV

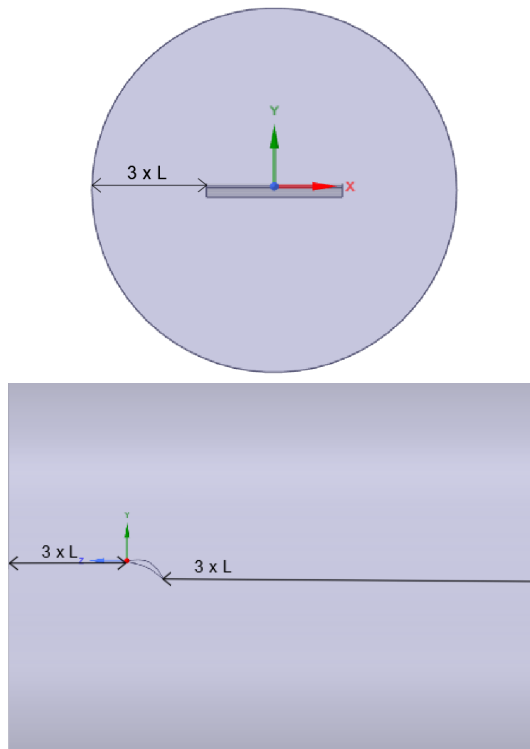
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Model Data

Pada penelitian ini, konfigurasi dua model *rigid sail* yang ditunjukkan pada Gambar 10 merupakan hasil optimasi menggunakan metode Taguchi. Metode ini dipilih karena mampu menghasilkan kombinasi parameter desain yang optimal dengan jumlah percobaan yang relatif efisien. Kedua model tersebut selanjutnya disesuaikan dengan dimensi utama kapal agar tetap memenuhi aspek kesesuaian operasional dan stabilitas. Tinggi masing-masing desain *rigid sail* ditetapkan sebesar 25 m, yang mempertimbangkan keseimbangan antara potensi gaya angkat yang dihasilkan dan batasan struktural serta operasional kapal.

Untuk mengevaluasi performa aerodinamika, setiap model dianalisis menggunakan lima variasi sudut serang (*angle of attack*), yaitu 5° , 10° , 15° , 20° , dan 25° . Variasi sudut serang ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik perubahan gaya angkat (*lift*) terhadap perubahan orientasi aliran angin.

Domain komputasi ditetapkan dalam bentuk silinder yang mengelilingi *Airfoil*. Bagian hulu diperpanjang sejauh $3L$ dari *Airfoil*, sedangkan bagian hilir diperpanjang hingga $10L$ dari *Airfoil* untuk memastikan perkembangan *wake flow* secara optimal. Untuk radial, batas *domain* silinder ditempatkan pada jarak $3L$ dari *Airfoil*, dengan L merupakan panjang *Airfoil* sebesar 7 m, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 12.



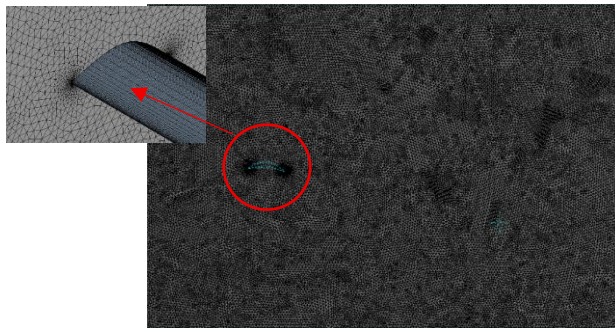
Gambar 4. 1 *Domain* Komputasi

4.2 Meshing

Setelah *domain* komputasi didefinisikan, tahap selanjutnya adalah proses *meshing* menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Proses ini bertujuan untuk mengubah *domain* menjadi elemen-elemen kecil (*mesh/Grid*) sehingga persamaan aliran fluida yang berbentuk diferensial parsial dapat diselesaikan secara numerik.

Pada penelitian ini, proses *meshing* dilakukan dengan memanfaatkan pengaturan *default meshing* yang tersedia pada perangkat lunak, dengan beberapa parameter utama yang telah ditentukan secara otomatis oleh sistem. Jenis elemen yang digunakan adalah *tetrahedral mesh* dengan *element order* bertipe linear. Pemilihan elemen tetrahedral ini didasarkan pada kemampuannya dalam mengakomodasi geometri kompleks seperti profil *Airfoil* atau *rigid sail*, serta kemudahan dalam proses *automatic meshing*. Selain itu, elemen linear dipilih karena memiliki kebutuhan komputasi yang lebih rendah dibandingkan elemen orde tinggi, sehingga cocok digunakan pada tahap awal simulasi.

Untuk meningkatkan kualitas hasil simulasi, dilakukan pengaturan kepadatan *mesh* (*mesh density*) yang lebih halus pada area kritis, khususnya di sekitar permukaan *Airfoil* dan daerah *wake* di belakang profil. Hal ini penting karena gradien kecepatan dan tekanan pada area tersebut cenderung tinggi, sehingga membutuhkan resolusi *mesh* yang lebih baik agar fenomena aliran dapat ditangkap secara akurat. Sementara itu, pada daerah yang jauh dari objek, digunakan *mesh* yang lebih kasar untuk menghemat waktu komputasi tanpa mengurangi akurasi secara signifikan.



Gambar 4. 2 *Meshing*

4.3 Pengaturan Simulasi CFD

Pengaturan parameter simulasi merupakan tahap penting dalam memastikan bahwa model *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang digunakan mampu merepresentasikan fenomena aliran secara akurat dan stabil. Setiap parameter yang dipilih, mulai dari jenis elemen *mesh*, model turbulensi, hingga skema numerik, memiliki pengaruh langsung terhadap kualitas hasil simulasi. Oleh karena itu, pemilihan parameter dilakukan dengan mempertimbangkan keseimbangan antara akurasi perhitungan dan efisiensi komputasi.

Dalam penelitian ini, konfigurasi simulasi disusun berdasarkan karakteristik aliran di sekitar *Airfoil* atau *rigid sail* serta mengacu pada praktik umum dalam analisis aerodinamika numerik. Pengaturan tersebut mencakup pemilihan model viskositas turbulen, penetapan kondisi batas, serta penggunaan skema *diskretisasi* dan metode penyelesaian yang sesuai untuk menangkap fenomena aliran secara optimal. Secara rinci,

seluruh parameter dan konfigurasi yang digunakan dalam simulasi dirangkum dalam Tabel 4. 1.

Tabel 4. 1 Pengaturan Simulasi

<i>Mesh element</i>	<i>3,5 – 6 million elements</i>
<i>Viscous model</i>	<i>k-omega SST</i>
<i>Outlet</i>	<i>Static pressure 0 Pa</i>
<i>Scheme</i>	<i>Coupled</i>
<i>Gradient</i>	<i>Leas squares cell based</i>
<i>Pressure</i>	<i>Second Order</i>
<i>Momentum</i>	<i>Second Order upwind</i>
<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>First Order upwind</i>
<i>Specific Dissipation Rate</i>	<i>First Order upwind</i>
<i>Convergence criteria</i>	<i>Residual target 10^{-3}</i>

4.4 Grid Independence

Grid independence dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi numerik tidak dipengaruhi secara signifikan oleh perubahan jumlah elemen *mesh* yang digunakan pada *domain* komputasi. Dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, kualitas dan kerapatan *mesh* berperan penting dalam menentukan tingkat akurasi prediksi karakteristik aerodinamika *Airfoil*. Oleh karena itu, pengujian ini dilakukan sebagai tahap validasi untuk memastikan bahwa solusi numerik yang diperoleh telah mencapai kondisi stabil dan tidak lagi sensitif terhadap perubahan jumlah elemen *mesh*.

Grid independence dilakukan dengan menjalankan simulasi pada beberapa variasi jumlah elemen *mesh* dengan kondisi simulasi yang sama, yaitu pada kecepatan angin 10 m/s dan sudut serang 15°. Hasil perbandingan simulasi untuk setiap variasi *mesh* disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3. Perbandingan tersebut mencakup parameter-parameter utama seperti koefisien gaya angkat (*coefficient of lift*) dan gaya angkat yang dihasilkan. Dengan membandingkan hasil antar variasi *mesh*, dapat dievaluasi sejauh mana perubahan jumlah elemen mempengaruhi hasil simulasi, sehingga dapat ditentukan *mesh* yang optimal dengan keseimbangan antara akurasi dan efisiensi komputasi.

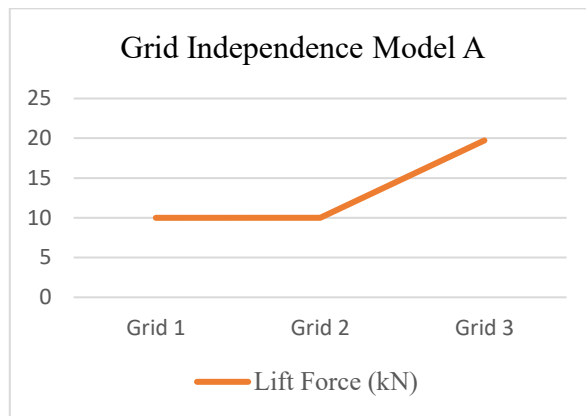
Tabel 4. 2 *Grid Independence* Model A

	Jenis <i>Domain</i>	Ukuran <i>mesh</i>	Total jumlah elemen	<i>Coefficien Lift</i>	<i>Lift Force</i> (kN)
<i>Grid 1</i>	$\frac{1}{2}$ <i>Domain</i>	0,5 m	3500639	1634,00	10,01
<i>Grid 2</i>	$\frac{1}{2}$ <i>Domain</i>	0,4 m	5630083	1633,57	10,00
<i>Grid 3</i>	<i>Full Domail</i>	0,5 m	6167328	32208,36	19,73

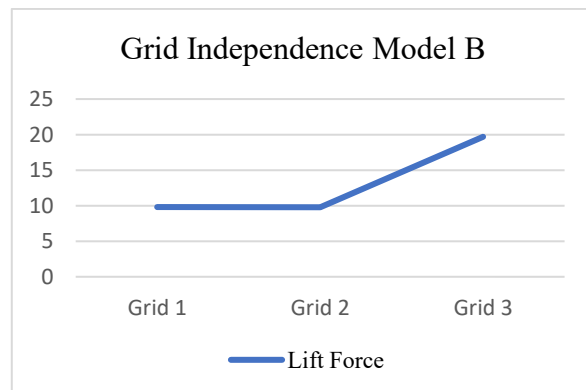
Tabel 4. 3 *Grid Independence* Model B

	Jenis <i>Domain</i>	Ukuran <i>mesh</i>	Total jumlah elemen	<i>Coefficien Lift</i>	<i>Lift Force</i> (kN)
<i>Grid 1</i>	$\frac{1}{2}$ <i>Domain</i>	0,5 m	3569464	15992,58	9,80
<i>Grid 2</i>	$\frac{1}{2}$ <i>Domain</i>	0,4 m	6201916	15969,30	9,78
<i>Grid 3</i>	<i>Full Domail</i>	0,5 m	6177595	32160,37	19,69

Hasil pengujian *grid independence* pada Model A dengan *domain* 1/2 menunjukkan bahwa selisih antara *Grid* 1 dan *Grid* 2 pada Tabel 2 hanya sekitar 0,11%. Kondisi serupa juga terjadi pada Model B dengan *domain* 1/2, di mana berdasarkan data pada Tabel 3 perbedaan antara *Grid* 4 dan *Grid* 5 hanya sekitar 0,15%. Nilai selisih yang sangat kecil tersebut mengindikasikan bahwa solusi numerik yang diperoleh telah mencapai kondisi *independensi grid*, sehingga hasil simulasi dapat dianggap valid karena perbedaan yang dihasilkan masih berada dalam batas toleransi $\pm 2\%$.



Gambar 4. 3 *Grid Independence* Model A



Gambar 4. 4 *Grid Independence* Model B

Selain itu, simulasi juga dilakukan dengan menggunakan *full domain* untuk memverifikasi bahwa pendekatan 1/2 *domain* dengan asumsi simetri tidak menyebabkan penyimpangan hasil yang signifikan. Berdasarkan perbandingan hasil pada *Grid* 3 pada Tabel 2 dan *Grid* 6 pada Tabel 3, perbedaan hasil antara simulasi 1/2 *domain* dan *full domain* berada pada kisaran sekitar 1–2%. Nilai tersebut masih berada dalam batas toleransi yang umum diterima dalam simulasi CFD.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa simulasi telah mencapai kondisi valid, karena perbedaan hasil antar variasi *mesh* maupun variasi *domain* relatif sangat kecil. Oleh karena itu, penggunaan jumlah *mesh* pada kisaran 3,5 hingga 6

juta elemen dengan pendekatan $1/2$ domain dapat digunakan untuk memperoleh hasil simulasi yang akurat sekaligus lebih efisien dari segi waktu komputasi dibandingkan dengan penggunaan *full domain*.

4.5 Hasil Simulasi Aerodinamika Model A

Koefisien gaya angkat (*lift coefficient* atau C_L) merupakan salah satu parameter utama dalam analisis performa aerodinamika *Airfoil* yang digunakan sebagai *rigid sail*. Nilai C_L menunjukkan kemampuan suatu *Airfoil* dalam menghasilkan gaya angkat akibat aliran udara yang melewati permukaannya. Dalam konteks aplikasi *rigid sail*, gaya angkat tersebut dapat dimanfaatkan sebagai gaya dorong tambahan sehingga mampu mengurangi kebutuhan daya mesin utama dan konsumsi bahan bakar.

Hasil simulasi gaya angkat pada *Airfoil* Model A untuk berbagai variasi sudut serang dan kecepatan angin ditunjukkan pada Tabel 4. 4, 4. 5, dan 4. 6. Berdasarkan hasil tersebut, dapat diamati bahwa gaya angkat mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya sudut serang pada setiap kondisi kecepatan angin. Tren ini menunjukkan konsistensi perilaku aerodinamika *Airfoil*, di mana sudut serang menjadi salah satu parameter utama yang mempengaruhi besarnya gaya angkat yang dihasilkan.

Peningkatan gaya angkat ini terjadi karena bertambahnya sudut serang menyebabkan perbedaan tekanan antara permukaan atas dan bawah *Airfoil* semakin signifikan [12]. Pada permukaan atas *Airfoil*, aliran udara mengalami percepatan yang mengakibatkan penurunan tekanan statis, sesuai dengan prinsip Bernoulli. Sebaliknya, pada permukaan bawah *Airfoil*, aliran udara relatif lebih lambat sehingga tekanan yang dihasilkan lebih tinggi. Distribusi tekanan yang tidak seimbang antara kedua permukaan ini menghasilkan gaya angkat yang bekerja tegak lurus terhadap arah aliran.

Tabel 4. 4 Gaya Angkat *Airfoil* Model A Kecepatan Angin 12 Knot

Sudut Serang	Ukuran <i>mesh</i>	Jumlah elemen <i>mesh</i> $\frac{1}{2}$ domain	Kecepatan Angin (Knot)	<i>Cof Lift</i> $\frac{1}{2}$ domain	<i>Cof Lift</i> full domain	<i>Lift Force</i> (N)	<i>Lift Force</i> (kN)
5°	0,5 m	3536179	12 knot	4124,21	8248,41	5052,15	5,05
10°	0,5 m	3526351	12 knot	5142,31	10284,63	6299,33	6,30
15°	0,5 m	3500639	12 knot	6187,94	12375,88	7580,23	7,58
20°	0,5 m	3520109	12 knot	6877,71	13755,41	8425,19	8,43
25°	0,4 m	5491315	12 knot	6837,17	13674,33	8375,53	8,38

Tabel 4. 5 Gaya Angkat *Airfoil* Model A Kecepatan Angin 18,77 Knot

Sudut Serang	Ukuran <i>mesh</i>	Jumlah elemen <i>mesh</i> $\frac{1}{2}$ domain	Kecepatan Angin (Knot)	<i>Cof Lift</i> $\frac{1}{2}$ domain	<i>Cof Lift</i> full domain	<i>Lift Force</i> (N)	<i>Lift Force</i> (kN)
5°	0,5 m	3536179	18,77 knot	10170,31	20340,61	12458,62	12,46
10°	0,5 m	3526351	18,77 knot	12643,90	25287,80	15488,78	15,49
15°	0,5 m	3500639	18,77 knot	15248,13	30496,27	18678,96	18,68
20°	0,5 m	3520109	18,77 knot	16954,13	33908,25	20768,80	20,77
25°	0,4 m	5491315	18,77 knot	16786,52	33573,04	20563,48	20,56

Tabel 4. 6 Gaya Angkat *Airfoil* Model A Kecepatan Angin 27 Knot

Sudut Serang	Ukuran <i>mesh</i>	Jumlah elemen <i>mesh</i> $\frac{1}{2}$ domain	Kecepatan Angin (Knot)	<i>Cof Lift</i> $\frac{1}{2}$ domain	<i>Cof Lift</i> full domain	<i>Lift Force</i> (N)	<i>Lift Force</i> (kN)
5°	0,5 m	3536179	27 knot	21050,68	42101,36	25787,08	25,79
10°	0,5 m	3526351	27 knot	26174,95	52349,90	32064,31	32,06
15°	0,5 m	3500639	27 knot	31545,60	63091,19	38643,36	38,64
20°	0,5 m	3520109	27 knot	35061,84	70123,68	42950,75	42,95
25°	0,4 m	5491315	27 knot	34793,05	69586,09	42621,48	42,62

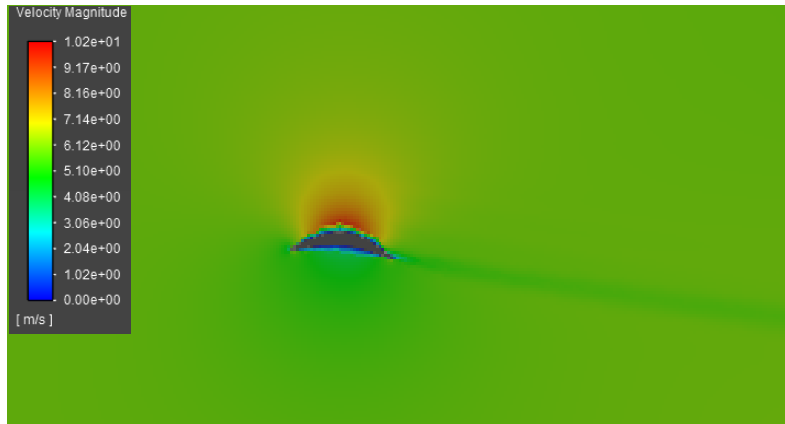
Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada Tabel 4.4, 4.5, 4.6, gaya angkat meningkat secara bertahap seiring dengan bertambahnya sudut serang hingga mencapai nilai maksimum pada sudut sekitar 20°. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada rentang sudut tersebut, aliran udara masih mampu mengikuti kontur permukaan *Airfoil* dengan baik, sehingga menghasilkan distribusi tekanan yang optimal antara permukaan atas dan bawah.

Namun, ketika sudut serang ditingkatkan hingga 25°, terjadi sedikit penurunan gaya angkat. Fenomena ini mengindikasikan awal terjadinya *aerodynamic stall*, yang disebabkan oleh mulai terpisahnya aliran (*flow separation*) pada permukaan atas *Airfoil*. Secara fisik, peningkatan sudut serang menyebabkan gradien tekanan yang merugikan (*adverse pressure gradient*) semakin besar di sepanjang permukaan atas. Ketika energi kinetik dalam lapisan batas tidak lagi cukup untuk melawan gradien tekanan tersebut, aliran tidak mampu tetap melekat pada permukaan dan mulai terpisah.

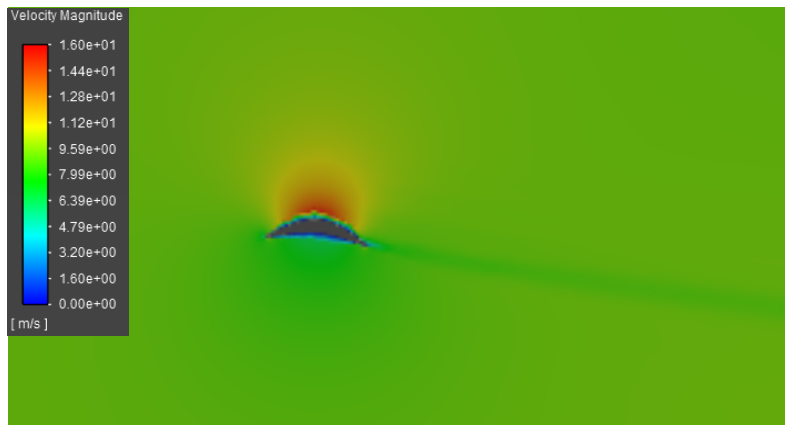
Akibat separasi ini, daerah bertekanan rendah di permukaan atas *Airfoil* berkurang, sehingga selisih tekanan antara permukaan atas dan bawah menurun. Hal ini secara langsung menyebabkan penurunan gaya angkat yang dihasilkan. Meskipun penurunannya relatif kecil, kondisi ini merupakan indikasi awal bahwa *Airfoil* telah melewati sudut serang optimal dan mulai memasuki kondisi *stall*.

Merujuk pada Tabel 4.4, Tabel 4.5, dan Tabel 4.6, dapat dianalisis bahwa kecepatan angin memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap peningkatan gaya angkat yang dihasilkan oleh *Airfoil* Model A. Pola yang ditunjukkan pada ketiga tabel memperlihatkan kecenderungan yang konsisten, yaitu semakin tinggi kecepatan aliran udara, maka semakin besar pula gaya angkat yang terbentuk. Hal ini menunjukan bahwa kecepatan angin merupakan variabel yang berperan dominan dalam menentukan performa aerodinamika *rigid sail*.

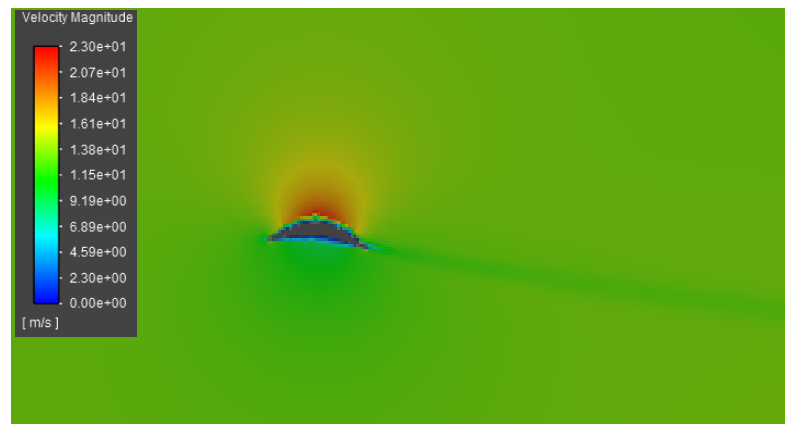
Secara teoritis, hubungan antara kecepatan aliran dan gaya angkat dapat dijelaskan melalui prinsip aerodinamika dasar, di mana gaya angkat dipengaruhi oleh energi kinetik fluida yang berinteraksi dengan permukaan *Airfoil*. Peningkatan kecepatan angin menyebabkan bertambahnya momentum aliran, sehingga distribusi tekanan di sekitar profil menjadi lebih intensif. Kondisi ini menghasilkan perbedaan tekanan yang semakin besar antara permukaan atas dan bawah *Airfoil*, yang pada akhirnya meningkatkan kemampuan profil dalam menghasilkan gaya angkat.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 5 Kontur *Velocity Magnitude* Airfoil Model A Sudut Serang 5° pada Kecepatan Angin (a)12 knot; (b)18,77 knot; (c) 27 knot

Berdasarkan Gambar 4.5 yang menampilkan kontur *Velocity Magnitude* di sekitar *airfoil rigid sail* pada sudut serang 5° , dapat diamati secara visual bagaimana distribusi kecepatan aliran berkembang ketika udara berinteraksi dengan geometri profil. Warna hijau yang mendominasi area jauh dari *airfoil* menunjukkan kondisi aliran bebas (*free stream*) yang relatif seragam sebelum mengalami pengaruh dari keberadaan *rigid sail*. Kondisi ini menandakan bahwa *domain* simulasi telah mampu merepresentasikan aliran masuk secara stabil dan homogen.

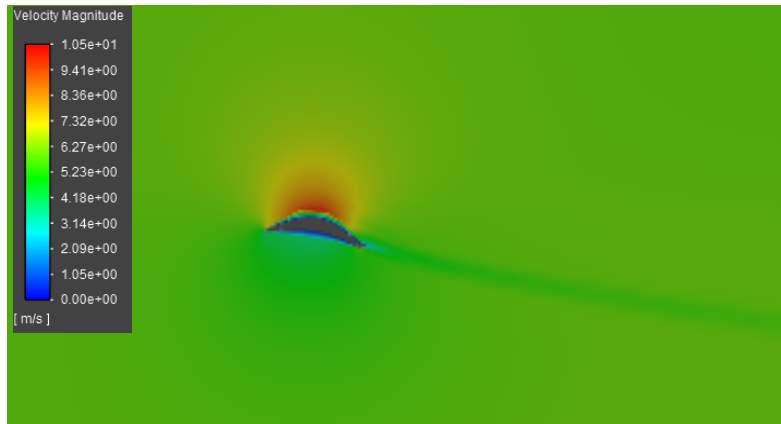
Di sekitar permukaan *airfoil* terlihat perubahan gradien warna yang cukup jelas. Pada sisi atas profil, muncul zona berwarna kuning hingga merah yang menandakan peningkatan kecepatan aliran secara signifikan. Area percepatan ini terletak terutama pada bagian puncak kelengkungan *airfoil*, yang menunjukkan bahwa geometri profil secara efektif mengarahkan aliran untuk bergerak lebih cepat di atas permukaan. Fenomena ini merupakan karakteristik khas *airfoil* cambered, di mana aliran di sisi atas harus menyesuaikan lintasan yang lebih panjang dan lebih melengkung. Akibatnya, energi kinetik aliran meningkat, sehingga kecepatan lokal menjadi lebih tinggi dibandingkan kecepatan aliran bebas.

Sebaliknya, pada sisi bawah *airfoil* tampak dominasi warna biru tua hingga biru muda yang menunjukkan kecepatan aliran lebih rendah. Zona ini mengindikasikan adanya perlambatan aliran akibat distribusi tekanan yang lebih tinggi pada bagian bawah profil. Perbedaan kecepatan antara sisi atas dan bawah membentuk gradien tekanan yang kuat. Sesuai prinsip Bernoulli, daerah dengan kecepatan lebih tinggi akan memiliki tekanan lebih rendah, sedangkan daerah dengan kecepatan lebih rendah akan memiliki tekanan lebih tinggi. Dengan demikian, kombinasi kedua kondisi tersebut menghasilkan resultan gaya aerodinamis ke arah atas, yaitu gaya angkat (*lift*), yang menjadi parameter utama dalam efektivitas *rigid sail* sebagai sistem propulsi bantu.

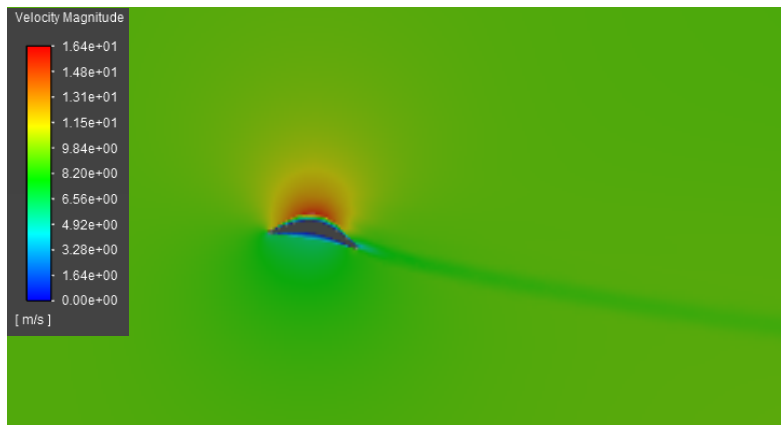
Jika diamati lebih rinci, pola warna di bagian depan *airfoil* menunjukkan adanya titik stagnasi di sekitar *leading edge*. Pada area ini, aliran mengalami perlambatan sesaat sebelum terbagi menuju sisi atas dan bawah. Posisi stagnasi yang sedikit bergeser ke bawah mengindikasikan bahwa sudut serang 5° telah menciptakan asimetris distribusi aliran yang cukup untuk menghasilkan *lift*, namun belum sampai pada kondisi ekstrem yang berpotensi memicu separasi dini.

Pada bagian *trailing edge*, terlihat jejak aliran (*wake*) yang memanjang ke belakang dengan warna hijau kebiruan. *Wake* ini relatif tipis dan terarah, menunjukkan bahwa aliran dari sisi atas dan bawah kembali menyatu dengan cukup stabil. Tidak tampak pembentukan pusaran besar maupun pelebaran zona turbulensi yang berlebihan. Kondisi ini menandakan bahwa kehilangan energi akibat turbulensi masih rendah, sehingga hambatan aerodinamis dapat ditekan. *Wake* yang ramping juga mengindikasikan bahwa *rigid sail* bekerja dalam kondisi efisiensi yang baik.

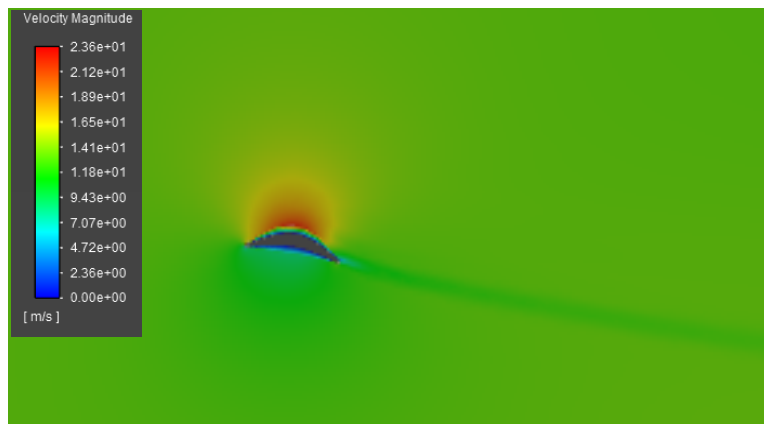
Ketiadaan area dengan gradien warna acak atau diskontinuitas tajam di sekitar permukaan *airfoil* menunjukkan bahwa aliran masih melekat (*attached flow*) sepanjang profil. Artinya, pada sudut serang 5° belum terjadi separasi lapisan batas yang signifikan. Hal ini sangat penting karena separasi aliran biasanya menjadi penyebab utama penurunan *lift* dan peningkatan *drag*. Dengan tetap melekatnya aliran, *rigid sail* dapat mempertahankan performa aerodinamis optimal tanpa memasuki kondisi *stall*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 6 Kontur *Velocity Magnitude* Airfoil Model A Sudut Serang 10° pada Kecepatan Angin (a)12 knot; (b)18,77 knot; (c) 27 knot

Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 4.6, pola distribusi kecepatan aliran di sekitar *airfoil rigid sail* menunjukkan karakteristik aerodinamika yang masih stabil dengan intensitas interaksi fluida–struktur yang lebih menonjol dibandingkan kondisi sebelumnya. Secara umum, area aliran bebas di sekitar profil tetap didominasi oleh warna hijau, yang merepresentasikan kecepatan aliran masuk yang seragam. Hal ini menandakan bahwa pengaruh utama terhadap perubahan distribusi kecepatan berasal dari keberadaan geometri *airfoil*, bukan dari gangguan numerik atau ketidakstabilan kondisi batas simulasi.

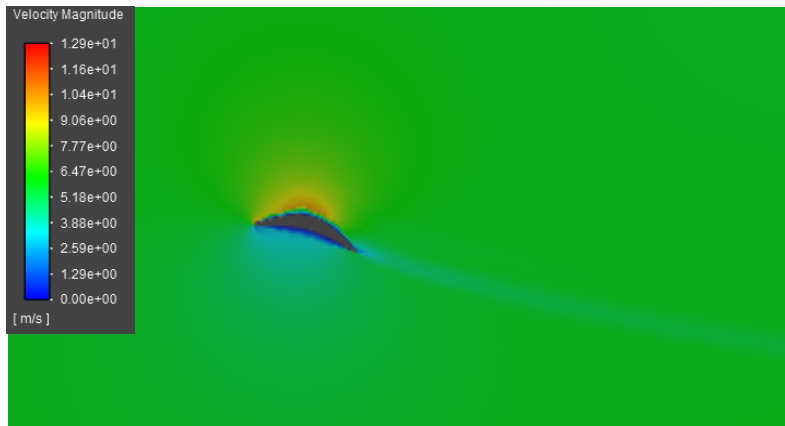
Pada permukaan atas *airfoil* terlihat zona percepatan aliran yang cukup luas, ditandai oleh gradasi warna kuning hingga merah dengan intensitas yang lebih pekat di atas puncak kelengkungan profil. Luasan daerah berkecepatan tinggi ini menunjukkan bahwa aliran mengalami akselerasi yang lebih besar ketika melewati sisi atas dibandingkan dengan kondisi sudut serang yang lebih rendah. Secara aerodinamis, kondisi ini mengindikasikan penurunan tekanan statis yang semakin signifikan pada permukaan atas, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan gaya angkat. Distribusi percepatan yang meluas juga menandakan bahwa *airfoil* masih mampu mempertahankan pola aliran terarah dengan efisiensi yang baik.

Pada sisi bawah *airfoil*, warna biru tua hingga biru muda tetap mendominasi, memperlihatkan adanya area dengan kecepatan yang lebih rendah. Kondisi tersebut merefleksikan tekanan statis yang relatif lebih tinggi dibandingkan sisi atas. Perbedaan distribusi kecepatan yang semakin kontras antara kedua sisi profil menunjukkan gradien tekanan yang lebih besar, sehingga resultan gaya aerodinamis yang dihasilkan cenderung meningkat. Dalam konteks *rigid sail*, fenomena ini menjadi indikator bahwa konfigurasi tersebut semakin efektif dalam menghasilkan gaya dorong berbasis angin.

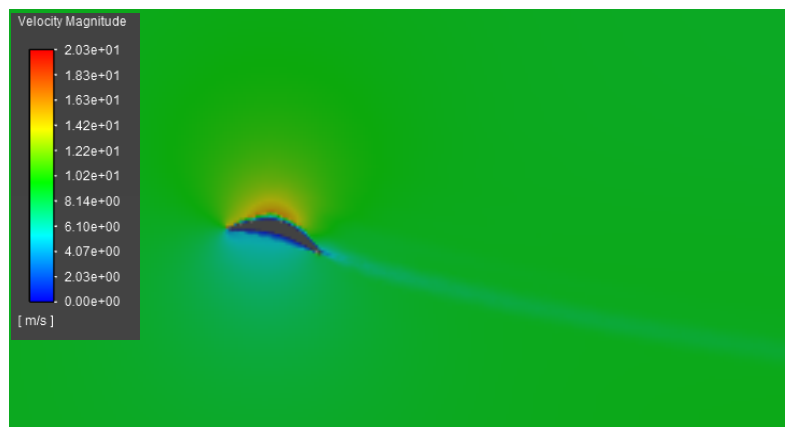
Di bagian *leading edge*, titik stagnasi masih terlihat jelas melalui perubahan warna yang menunjukkan perlambatan aliran lokal sebelum udara terbagi ke sisi atas dan bawah. Posisi titik stagnasi tampak sedikit lebih rendah, menandakan bahwa sudut serang yang diterapkan menghasilkan kecenderungan distribusi aliran yang semakin asimetris. Pergeseran ini merupakan karakteristik umum pada peningkatan sudut serang, di mana aliran lebih diarahkan ke sisi atas untuk menghasilkan percepatan yang lebih besar.

Pada bagian *trailing edge* dan daerah hilir, *wake region* tampak lebih panjang dengan warna hijau kebiruan yang membentuk jejak aliran memanjang. Meskipun demikian, pola *wake* masih terlihat relatif tipis dan terarah, tanpa pembentukan vorteks besar yang mengindikasikan separasi masif. Hal ini menunjukkan bahwa aliran dari kedua sisi profil masih dapat bergabung kembali secara cukup stabil. Keberadaan *wake* yang lebih panjang mengindikasikan adanya peningkatan kehilangan energi akibat interaksi aliran, namun belum sampai pada tingkat yang secara signifikan menurunkan performa aerodinamika.

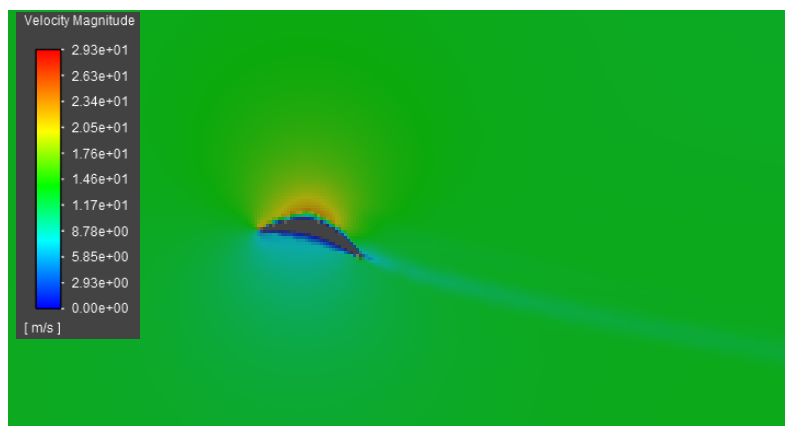
Tidak tampak adanya zona resirkulasi besar atau diskontinuitas aliran yang ekstrem di sekitar permukaan *airfoil*. Kondisi ini menandakan bahwa lapisan batas masih tetap melekat pada sebagian besar permukaan *airfoil*, meskipun gradien tekanan yang dihasilkan semakin tinggi. Dengan demikian, *rigid sail* masih beroperasi dalam kondisi *attached flow*, sehingga belum memasuki kondisi *stall*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 7 Kontur *Velocity Magnitude* Airfoil Model A Sudut Serang 15° pada Kecepatan Angin (a)12 knot; (b)18,77 knot; (c) 27 knot

Berdasarkan visualisasi kontur *Velocity Magnitude* pada gambar 4.7, distribusi kecepatan aliran di sekitar *airfoil rigid sail* menunjukkan perkembangan karakteristik aerodinamika yang semakin kompleks seiring meningkatnya intensitas interaksi antara aliran dan geometri profil. Area aliran bebas tetap didominasi oleh warna hijau, yang merepresentasikan kondisi kecepatan masuk yang seragam. Keberadaan zona ini menunjukkan bahwa aliran sebelum berinteraksi dengan *airfoil* masih stabil, sehingga perubahan pola yang muncul di sekitar profil dapat didistribusikan langsung pada pengaruh bentuk *airfoil* dan sudut serang yang diterapkan.

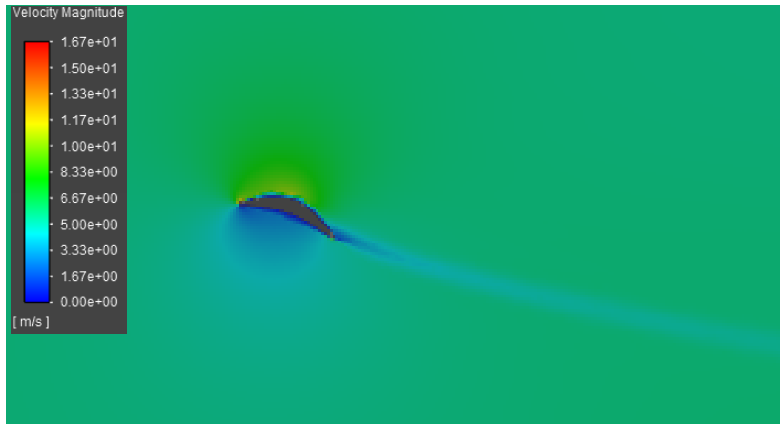
Pada sisi atas *airfoil*, zona percepatan aliran tetap terlihat melalui gradasi warna kuning hingga oranye yang terkonsentrasi di atas puncak kelengkungan. Namun, jika dibandingkan dengan kondisi sebelumnya, luasan daerah berkecepatan tinggi tampak sedikit lebih terlokalisasi. Hal ini mengindikasikan bahwa percepatan aliran masih terjadi secara signifikan, tetapi distribusinya mulai mengalami perubahan akibat peningkatan gradien tekanan di sepanjang permukaan atas. Dalam konteks aerodinamika, kondisi tersebut menunjukkan bahwa profil masih menghasilkan tekanan rendah pada sisi atas, sehingga gaya angkat tetap terbentuk secara efektif.

Pada sisi bawah *airfoil*, area dengan warna biru muda hingga sian tampak lebih luas dibandingkan kondisi sebelumnya. Hal ini menandakan bahwa aliran pada bagian bawah mengalami perlambatan yang lebih dominan, sehingga tekanan statis di bawah profil meningkat. Kontras distribusi kecepatan antara sisi atas dan bawah tetap terjaga, yang berarti gradien tekanan masih cukup besar untuk menghasilkan gaya angkat. Akan tetapi, distribusi yang semakin luas pada sisi bawah juga mengindikasikan bahwa pengaruh sudut serang terhadap pola aliran mulai semakin kuat.

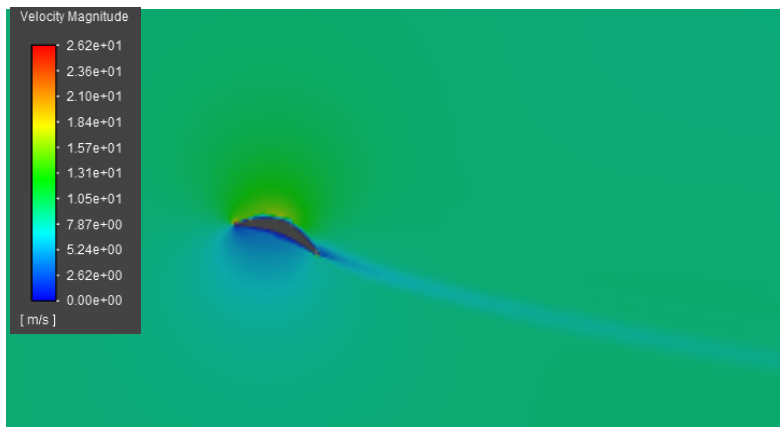
Karakteristik penting terlihat pada bagian *trailing edge* dan daerah hilir, di mana *wake region* tampak lebih jelas dan lebih lebar dibandingkan gambar sebelumnya. Warna biru muda yang memanjang ke belakang menunjukkan adanya penurunan kecepatan pada jejak aliran akibat rugi energi yang lebih besar. Pelebaran *wake* ini mengindikasikan bahwa interaksi aliran di belakang profil menjadi lebih intens, yang umumnya berkaitan dengan peningkatan hambatan tekanan (*pressure drag*). Walaupun demikian, pola *wake* masih terlihat terarah dan belum menunjukkan pembentukan vorteks besar yang tidak stabil.

Di sekitar permukaan *airfoil*, aliran masih cenderung melekat pada kontur profil, meskipun terdapat indikasi awal penebalan lapisan batas pada sisi atas mendekati *trailing edge*. Fenomena ini menunjukkan bahwa gradien tekanan merugikan mulai berkembang, namun belum cukup kuat untuk memicu separasi penuh. Dengan demikian, *rigid sail* masih berada dalam rezim *attached flow*, walaupun mendekati batas transisi menuju kondisi aliran yang lebih tidak stabil apabila sudut serang terus ditingkatkan.

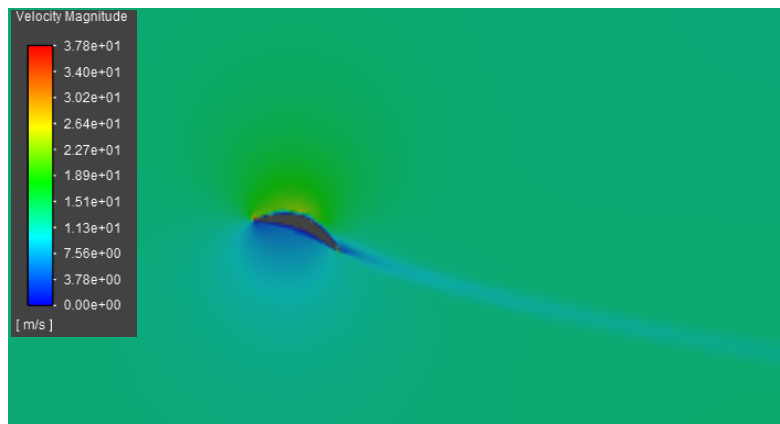
Titik stagnasi pada *leading edge* tetap dapat diamati melalui perubahan warna yang menunjukkan penurunan kecepatan lokal sebelum aliran terbagi. Posisi titik stagnasi yang bergeser semakin ke bawah memperlihatkan bahwa asimetris distribusi aliran semakin besar. Pergeseran ini merupakan indikasi bahwa sudut serang memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan perbedaan tekanan antara sisi atas dan bawah.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 8 Kontur *Velocity Magnitude* Airfoil Model A Sudut Serang 20° pada Kecepatan Angin (a)12 knot; (b)18,77 knot; (c) 27 knot

Berdasarkan visualisasi kontur *Velocity Magnitude* pada gambar 4.8, distribusi kecepatan aliran di sekitar *airfoil rigid sail* menunjukkan perubahan karakteristik aerodinamika yang semakin signifikan. Dibandingkan kondisi sebelumnya, pola aliran pada gambar ini memperlihatkan intensitas interaksi fluida-struktur yang lebih besar, yang ditunjukkan oleh pergeseran distribusi warna di sekitar profil serta perkembangan *wake region* yang semakin dominan. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh sudut serang terhadap perilaku aliran telah meningkat secara nyata.

Area aliran bebas di sekitar *airfoil* masih tampak relatif seragam, ditunjukkan oleh warna hijau kehijauan pada *domain* utama. Namun, distribusi warna latar secara keseluruhan terlihat sedikit bergeser ke rona yang lebih kebiruan, menandakan adanya perubahan kecepatan rata-rata lokal akibat interaksi yang lebih luas dengan profil. Kondisi ini menunjukkan bahwa efek gangguan aliran tidak hanya terbatas di sekitar permukaan *airfoil*, tetapi mulai memengaruhi area hilir secara lebih besar.

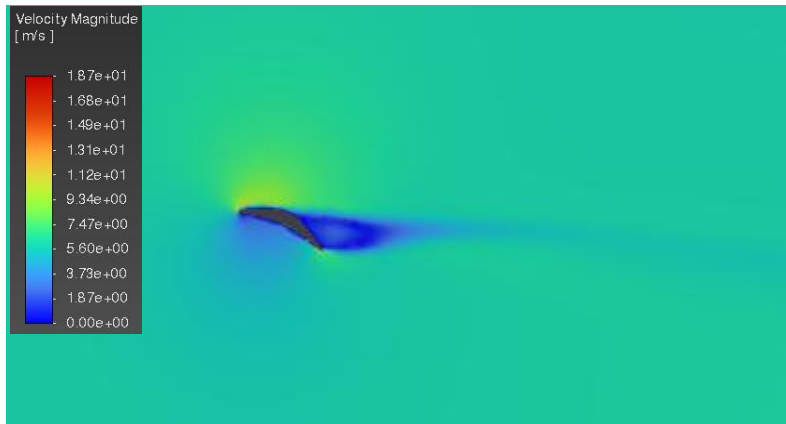
Pada sisi atas *airfoil*, zona percepatan aliran ditunjukkan oleh warna kuning cerah yang terkonsentrasi di area puncak profil. Akan tetapi, intensitas warna hangat tersebut tampak lebih terbatas dibandingkan kondisi pada sudut serang menengah. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun percepatan aliran masih terjadi, distribusinya tidak lagi berkembang secara optimal. Dalam perspektif aerodinamika, kondisi ini dapat diinterpretasikan sebagai mulai berkurangnya efektivitas pembentukan tekanan rendah di sisi atas akibat meningkatnya gradien tekanan merugikan.

Pada sisi bawah *airfoil*, area berwarna biru hingga sian tampak jauh lebih luas dan intensif. Hal ini menunjukkan perlambatan aliran yang semakin besar, sehingga tekanan statis pada permukaan bawah meningkat secara signifikan. Secara teoritis, peningkatan tekanan bawah tetap mendukung pembentukan gaya angkat. Namun, dominasi area berkecepatan rendah yang semakin meluas juga menjadi indikasi bahwa distribusi aliran mulai kurang efisien, karena energi kinetik aliran berkurang secara substansial.

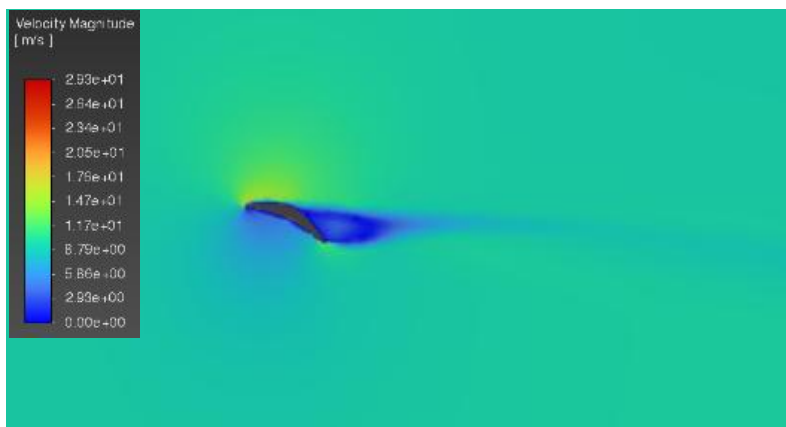
Perubahan paling mencolok terlihat pada bagian *trailing edge* dan daerah hilir, di mana *wake region* berkembang lebih panjang dan lebih lebar. Warna biru muda yang memanjang ke belakang menunjukkan penurunan kecepatan aliran secara signifikan akibat rugi energi yang lebih besar. Pelebaran *wake* ini merupakan indikator meningkatnya hambatan tekanan (*pressure drag*), karena aliran membutuhkan waktu lebih lama untuk pulih menuju kondisi bebas. Dalam konteks performa *rigid sail*, kondisi tersebut menandakan penurunan efisiensi aerodinamika secara bertahap.

Selain itu, terdapat indikasi penebalan lapisan batas pada sisi atas mendekati *trailing edge*. Fenomena ini menunjukkan bahwa aliran mulai mengalami kesulitan mempertahankan keterikatan terhadap permukaan akibat gradien tekanan merugikan yang semakin kuat. Walaupun belum tampak separasi penuh, gejala awal pelepasan aliran lokal mulai terlihat. Kondisi tersebut menandai transisi menuju rezim aliran yang lebih tidak stabil dan mendekati batas operasi optimal.

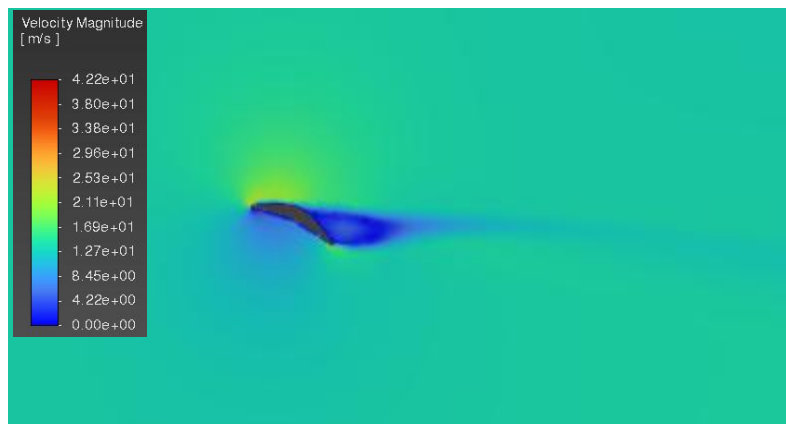
Titik stagnasi pada *leading edge* terlihat semakin bergeser ke bawah, menandakan asimetris distribusi aliran yang semakin besar. Pergeseran ini menunjukkan bahwa sudut serang yang diterapkan telah meningkatkan orientasi aliran ke sisi atas, namun pada saat yang sama memperbesar risiko gangguan lapisan batas. Hal ini menjadi salah satu karakteristik umum ketika *airfoil* mendekati kondisi kritis sebelum *stall*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 9 Kontur *Velocity Magnitude* Airfoil Model A Sudut Serang 25° pada Kecepatan Angin (a)12 knot; (b)18,77 knot; (c) 27 knot

Berdasarkan visualisasi kontur *Velocity Magnitude* pada gambar 4.9, pola distribusi kecepatan aliran di sekitar *airfoil rigid sail* menunjukkan perubahan aerodinamika yang sangat signifikan dibandingkan kondisi sebelumnya. Interaksi antara aliran udara dan geometri profil pada konfigurasi ini menghasilkan fenomena yang mengindikasikan penurunan kestabilan aliran, ditandai dengan terbentuknya zona berkecepatan rendah yang lebih luas di belakang *airfoil*. Kondisi ini memperlihatkan bahwa *airfoil* mulai memasuki rezim operasi yang kurang efisien secara aerodinamis.

Pada sisi atas *airfoil*, zona percepatan aliran masih terlihat melalui warna kuning kehijauan di sekitar puncak profil. Akan tetapi, area percepatan ini tampak semakin terbatas dan intensitasnya menurun dibandingkan konfigurasi sebelumnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa kemampuan profil untuk mempertahankan aliran berkecepatan tinggi di atas permukaan mulai berkurang. Dalam perspektif distribusi tekanan, penurunan intensitas percepatan ini menandakan berkurangnya efektivitas pembentukan daerah tekanan rendah pada sisi atas, sehingga kontribusi terhadap gaya angkat mulai menurun.

Pada sisi bawah *airfoil*, distribusi warna biru muda hingga biru tua tampak sangat dominan, terutama di area belakang profil. Hal ini menunjukkan adanya perlambatan aliran yang besar serta pembentukan zona energi rendah yang meluas. Area tersebut merefleksikan tekanan lokal yang tidak lagi terdistribusi secara optimal, sehingga gradien tekanan yang sebelumnya mendukung pembentukan *lift* mulai terganggu. Dengan kata lain, walaupun perbedaan tekanan antara sisi atas dan bawah masih ada, efektivitasnya dalam menghasilkan gaya angkat mulai menurun akibat perubahan pola aliran yang kurang stabil.

Fenomena paling mencolok pada gambar ini adalah terbentuknya *wake region* yang sangat lebar dan intens di belakang *airfoil*. Zona berwarna biru tua yang berkembang segera setelah *trailing edge* menunjukkan penurunan kecepatan aliran secara drastis. Pelebaran *wake* yang signifikan merupakan indikasi meningkatnya kehilangan energi akibat turbulensi dan ketidakstabilan aliran. Secara aerodinamis, kondisi ini berkaitan langsung dengan kenaikan hambatan tekanan (*pressure drag*) yang besar. *Wake* yang melebar juga menandakan bahwa aliran membutuhkan jarak lebih panjang untuk kembali ke kondisi bebas, sehingga efisiensi keseluruhan profil menurun.

Selain itu, terbentuknya zona berkecepatan rendah yang menonjol di belakang sisi atas profil mengindikasikan adanya separasi aliran. Lapisan batas tidak lagi mampu mengikuti kontur permukaan secara sempurna akibat gradien tekanan merugikan yang semakin kuat. Akibatnya, aliran terlepas dari permukaan dan membentuk daerah resirkulasi di belakang *airfoil*. Separasi ini menjadi penanda bahwa profil telah melewati kondisi operasi optimal dan mulai mendekati atau memasuki fase *stall* parsial.

Titik stagnasi pada *leading edge* juga tampak mengalami pergeseran yang lebih ekstrem ke bawah, menunjukkan peningkatan asimetri distribusi aliran. Pergeseran ini menandakan bahwa sudut serang yang diterapkan sangat memengaruhi orientasi aliran, namun pada saat yang sama meningkatkan risiko pelepasan lapisan batas. Dalam kondisi seperti ini, tambahan sudut serang tidak lagi menghasilkan peningkatan *lift* yang proporsional, melainkan lebih banyak memicu kenaikan *drag*.

4.6 Hasil Simulasi Aerodinamika Model B

Hasil simulasi pada *Airfoil Model B* menunjukkan karakteristik aerodinamika yang sedikit berbeda dibandingkan dengan Model A. Secara umum, Model B memperlihatkan tren gaya angkat yang lebih stabil, bahkan cenderung terus meningkat

hingga sudut serang yang lebih tinggi. Perbedaan ini menjadi indikasi bahwa geometri *Airfoil* Model B memiliki performa aerodinamika yang lebih unggul, khususnya dalam mempertahankan kestabilan aliran pada kondisi sudut serang besar.

Hal ini terlihat pada hasil simulasi yang disajikan dalam Tabel 4.7, 4.8, dan 4.9 untuk berbagai variasi kecepatan angin. Pada setiap kondisi kecepatan, gaya angkat meningkat seiring dengan bertambahnya sudut serang, termasuk pada sudut serang 25° yang masih menunjukkan kenaikan dan belum mengalami penurunan seperti yang terjadi pada Model A. Tren ini menunjukkan bahwa hubungan antara sudut serang dan gaya angkat pada Model B masih berada dalam kondisi linear atau mendekati linear pada rentang sudut yang dianalisis.

Tabel 4. 7 Gaya Angkat *Airfoil* Model B Kecepatan Angin 12 Knot

Sudut Serang	Ukuran <i>mesh</i>	Jumlah elemen <i>mesh</i> $\frac{1}{2}$ domain	Kecepatan Angin (Knot)	<i>Cof Lift</i> $\frac{1}{2}$ domain	<i>Cof Lift</i> full domain	<i>Lift Force</i> (N)	<i>Lift Force</i> (kN)
5°	0,47 m	3579667	12 knot	4139,58	8279,17	5070,99	5,07
10°	0,4 m	5202740	12 knot	5276,05	10552,10	6463,16	6,46
15°	0,47 m	3569464	12 knot	6138,47	12276,95	7519,63	7,52
20°	0,4 m	5055466	12 knot	6695,27	13390,54	8201,71	8,20
25°	0,4 m	5184924	12 knot	7497,17	14994,33	9184,03	9,18

Tabel 4. 8 Gaya Angkat *Airfoil* Model B Kecepatan Angin 18,77 Knot

Sudut Serang	Ukuran <i>mesh</i>	Jumlah elemen <i>mesh</i> $\frac{1}{2}$ domain	Kecepatan Angin (Knot)	<i>Cof Lift</i> $\frac{1}{2}$ domain	<i>Cof Lift</i> full domain	<i>Lift Force</i> (N)	<i>Lift Force</i> (kN)
5°	0,47 m	3579667	18,77 knot	10273,76	20547,52	12585,36	12,59
10°	0,4 m	5202740	18,77 knot	13050,35	26100,71	15986,68	15,99
15°	0,47 m	3569464	18,77 knot	14859,25	29718,49	18202,58	18,20
20°	0,4 m	5055466	18,77 knot	16466,70	32933,39	20171,71	20,17
25°	0,4 m	5184924	18,77 knot	18497,28	36994,56	22659,17	22,66

Tabel 4. 9 Gaya Angkat *Airfoil* Model B Kecepatan Angin 27 Knot

Sudut Serang	Ukuran <i>mesh</i>	Jumlah elemen <i>mesh</i> $\frac{1}{2}$ domain	Kecepatan Angin (Knot)	<i>Cof Lift</i> $\frac{1}{2}$ domain	<i>Cof Lift</i> full domain	<i>Lift Force</i> (N)	<i>Lift Force</i> (kN)
5°	0,47 m	3579667	27 knot	21201,74	42403,48	25972,13	25,97
10°	0,4 m	5202740	27 knot	27045,27	54090,54	33130,45	33,13
15°	0,47 m	3569464	27 knot	30901,35	61802,70	37854,15	37,85
20°	0,4 m	5055466	27 knot	34198,79	68397,58	41893,52	41,89
25°	0,4 m	5184924	27 knot	38290,96	76581,91	46906,42	46,91

Berdasarkan hasil simulasi yang disajikan pada Tabel 4.7, Tabel 4.8, dan Tabel 4.9, gaya angkat pada *Airfoil* Model B menunjukkan kecenderungan meningkat secara

progresif seiring dengan bertambahnya sudut serang pada seluruh variasi kecepatan angin. Pola ini mengindikasikan bahwa hingga batas sudut pengujian, aliran udara masih mampu mengikuti kontur permukaan *airfoil* secara efektif, sehingga distribusi tekanan antara sisi atas dan bawah profil tetap terbentuk secara optimal.

Kenaikan gaya angkat yang berkelanjutan tersebut menunjukkan bahwa Model B memiliki kemampuan aerodinamis yang baik dalam mempertahankan kestabilan aliran. Pada rentang sudut serang yang diuji, belum terlihat adanya indikasi penurunan performa, sehingga dapat diasumsikan bahwa kondisi *stall* belum terjadi. Hal ini menandakan bahwa geometri *airfoil* masih mampu menjaga lapisan batas tetap melekat pada permukaan (*attached flow*), sehingga proses pembentukan gaya angkat berlangsung secara efisien.

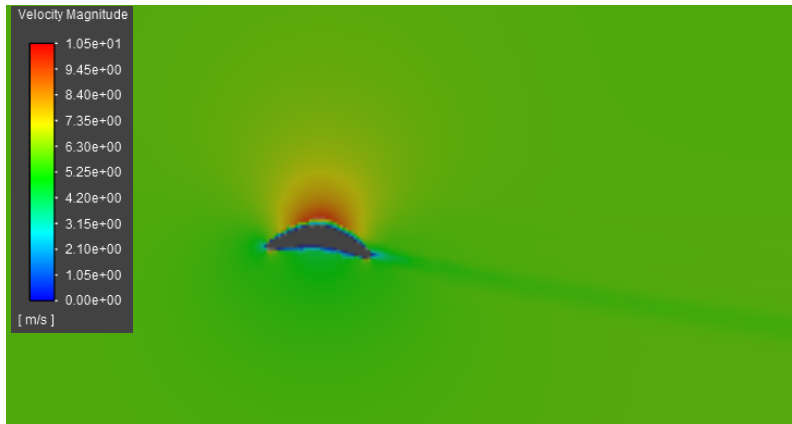
Tidak terjadinya penurunan gaya angkat pada sudut serang tertinggi menunjukkan bahwa Model B memiliki toleransi yang lebih besar terhadap peningkatan sudut serang dibandingkan model dengan karakteristik *stall* lebih awal. Secara fisik, kondisi ini mengindikasikan bahwa pengaruh *adverse pressure gradient* pada permukaan atas *airfoil* masih dapat diatasi oleh energi kinetik dalam lapisan batas, sehingga aliran belum mengalami separasi yang signifikan. Dengan demikian, distribusi tekanan di sekitar profil tetap mendukung peningkatan gaya angkat.

Kemampuan mempertahankan aliran melekat hingga sudut serang tinggi memberikan keuntungan operasional yang penting, khususnya dalam aplikasi *rigid sail*. Dalam kondisi angin yang dinamis, *airfoil* dengan karakteristik tersebut akan lebih adaptif terhadap variasi arah dan intensitas aliran tanpa mengalami penurunan performa secara tiba-tiba. Oleh sebab itu, Model B dapat dikategorikan sebagai profil yang memiliki stabilitas aerodinamis lebih baik dalam rentang operasi yang luas.

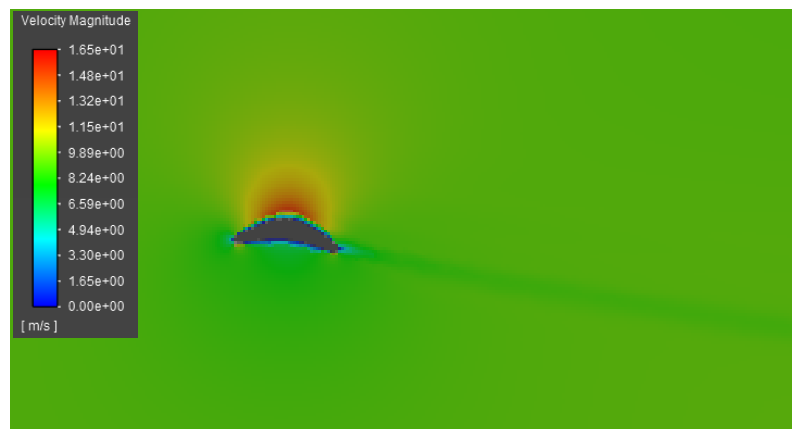
Selain pengaruh sudut serang, variasi kecepatan angin memberikan kontribusi yang sangat signifikan terhadap besarnya gaya angkat yang dihasilkan oleh *airfoil*. Peningkatan kecepatan aliran menyebabkan bertambahnya energi kinetik fluida yang berinteraksi dengan permukaan profil, sehingga distribusi tekanan di sekitar *airfoil* menjadi lebih intensif. Kondisi ini menghasilkan gaya angkat yang lebih besar, tanpa mengubah pola dasar hubungan antara sudut serang dan respons aerodinamis.

Secara teoritis, gaya angkat berhubungan erat dengan tekanan dinamis aliran, yang nilainya sebanding dengan kuadrat kecepatan fluida. Dengan demikian, semakin tinggi kecepatan angin, semakin besar pula tekanan dinamis yang bekerja pada permukaan *airfoil*. Peningkatan tekanan dinamis tersebut memperbesar selisih tekanan antara permukaan atas dan bawah profil, sehingga kemampuan *airfoil* dalam menghasilkan gaya angkat juga meningkat secara signifikan.

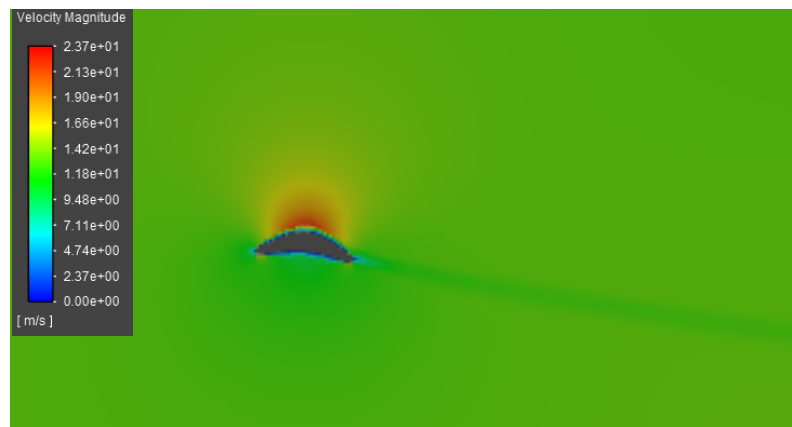
Berdasarkan hasil simulasi Model B, pengaruh kecepatan angin terlihat tidak hanya pada peningkatan besarnya gaya angkat, tetapi juga pada kestabilan pola aerodinamika yang dihasilkan. Kecepatan aliran yang lebih tinggi memberikan momentum yang lebih besar kepada lapisan udara di sekitar profil, sehingga aliran memiliki kecenderungan untuk tetap mengikuti kontur permukaan *airfoil*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 10 Kontur *Velocity Magnitude* Airfoil Model B Sudut Serang 5° pada Kecepatan Angin (a)12 knot; (b)18,77 knot; (c) 27 knot

Berdasarkan visualisasi kontur *Velocity Magnitude* pada gambar 4.10, distribusi kecepatan aliran di sekitar *airfoil rigid sail* menunjukkan pola aerodinamika yang stabil dan efisien. Area aliran bebas di sekitar profil didominasi oleh warna hijau, yang menunjukkan bahwa kecepatan aliran masuk relatif seragam sebelum dipengaruhi oleh keberadaan *airfoil*. Kondisi ini menandakan bahwa simulasi berlangsung pada lingkungan aliran yang terkontrol, sehingga perubahan distribusi kecepatan dapat dianalisis secara akurat.

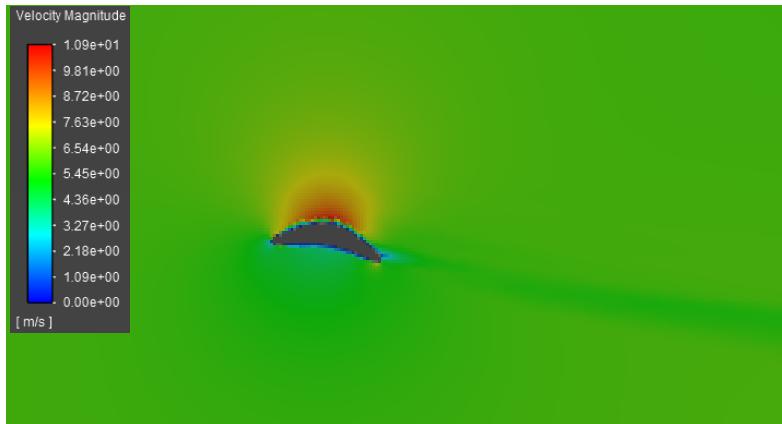
Pada sisi atas *airfoil* terbentuk zona percepatan aliran yang ditandai dengan gradasi warna kuning hingga merah di sepanjang permukaan atas profil. Fenomena ini menunjukkan bahwa aliran udara pada sisi atas bergerak dengan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan aliran bebas. Peningkatan kecepatan tersebut merupakan konsekuensi langsung dari bentuk lengkung *airfoil*, yang memaksa aliran mengikuti lintasan yang lebih panjang dan menghasilkan percepatan lokal. Secara aerodinamis, kondisi ini berkorelasi dengan penurunan tekanan statis pada sisi atas permukaan, sehingga berkontribusi signifikan terhadap pembentukan gaya angkat.

Di sisi bawah *airfoil*, warna biru tua hingga biru muda menunjukkan bahwa aliran bergerak lebih lambat dibandingkan sisi atas. Kecepatan yang lebih rendah ini menunjukkan adanya tekanan yang lebih tinggi pada sisi bawah. Perbedaan tekanan antara sisi atas dan sisi bawah menciptakan resultan gaya ke arah atas, yang dikenal sebagai gaya angkat (*lift*). Distribusi kecepatan yang kontras antara kedua sisi profil menunjukkan bahwa *airfoil* bekerja secara efektif dalam menghasilkan gaya aerodinamis.

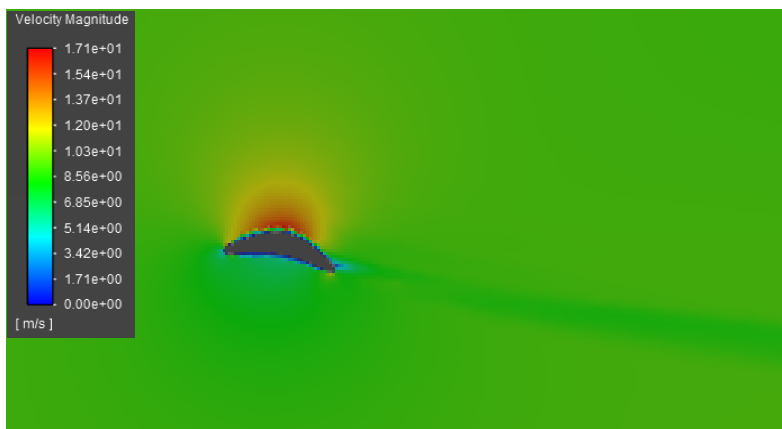
Pada bagian depan *airfoil* (*leading edge*), terlihat perubahan warna yang menandakan adanya titik stagnasi, yaitu lokasi di mana aliran mengalami perlambatan sebelum terbagi ke sisi atas dan bawah. Posisi titik stagnasi yang sedikit bergeser ke bawah menunjukkan adanya sudut serang yang cukup untuk menciptakan asimetri aliran, namun masih berada dalam kondisi yang stabil.

Di bagian belakang *airfoil* (*trailing edge*), jejak aliran atau *wake* tampak relatif tipis dan memanjang secara teratur. Warna hijau kebiruan pada daerah ini menunjukkan adanya sedikit penurunan kecepatan akibat kehilangan energi setelah aliran melewati profil. Namun, *wake* yang terbentuk masih sempit dan terarah, sehingga dapat disimpulkan bahwa hambatan aerodinamis masih rendah. Kondisi ini menandakan bahwa energi aliran belum banyak terbuang dalam bentuk turbulensi.

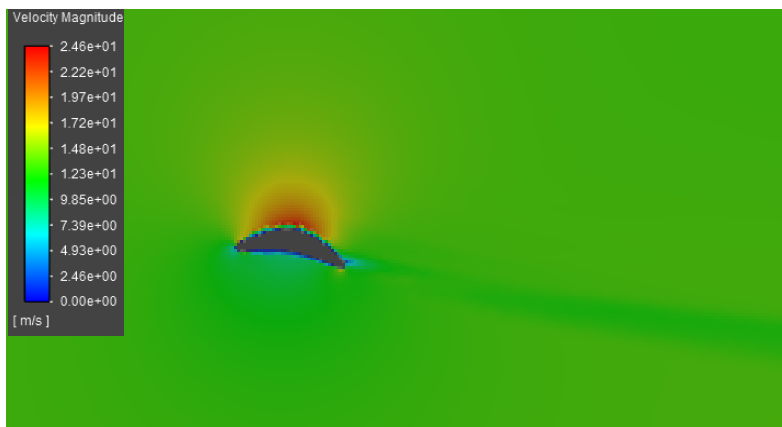
Selain itu, tidak terlihat adanya zona berkecepatan rendah yang besar atau pola aliran yang terputus di sekitar permukaan *airfoil*. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan batas masih mampu melekat pada seluruh permukaan profil. Dengan kata lain, belum terjadi separasi aliran yang signifikan. Kondisi *attached flow* seperti ini sangat penting karena memungkinkan *airfoil* menghasilkan gaya angkat secara optimal tanpa peningkatan hambatan yang berlebihan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 11 Kontur *Velocity Magnitude* Airfoil Model B Sudut Serang 10° pada Kecepatan Angin (a)12 knot; (b)18,77 knot; (c) 27 knot

Berdasarkan visualisasi kontur *Velocity Magnitude* pada gambar 4.11, distribusi kecepatan aliran di sekitar *airfoil rigid sail* masih menunjukkan pola aerodinamika yang stabil, namun dengan intensitas interaksi fluida–struktur yang lebih besar dibandingkan kondisi sebelumnya. Area aliran bebas tetap didominasi oleh warna hijau, yang menunjukkan bahwa kecepatan aliran masuk relatif seragam. Hal ini menegaskan bahwa perubahan pola kecepatan di sekitar profil terutama dipengaruhi oleh geometri *airfoil* dan sudut serang yang diterapkan.

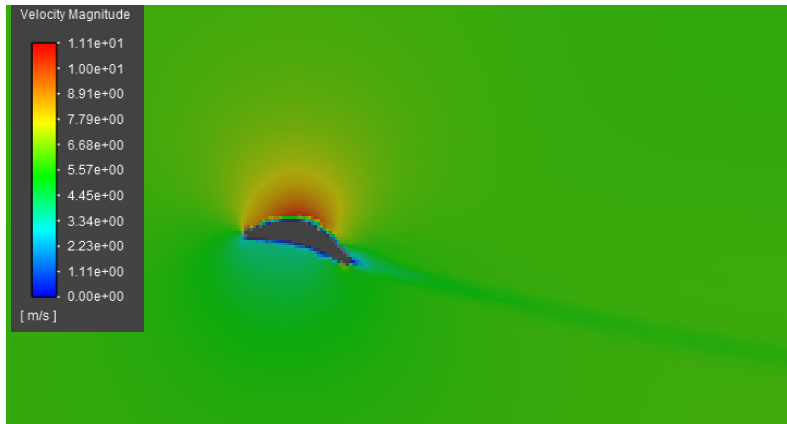
Pada sisi atas *airfoil* terlihat zona percepatan aliran yang cukup luas, ditandai dengan warna kuning hingga merah. Dibandingkan kondisi sebelumnya, area percepatan ini tampak sedikit lebih berkembang, terutama di sekitar puncak kelengkungan profil. Hal ini menunjukkan bahwa aliran udara mengalami akselerasi yang lebih besar ketika melewati sisi atas. Peningkatan kecepatan tersebut menghasilkan tekanan yang lebih rendah pada permukaan atas, sehingga berkontribusi terhadap kenaikan gaya angkat yang dihasilkan oleh *rigid sail*.

Di sisi bawah *airfoil*, warna biru tua hingga biru muda tetap mendominasi, menandakan bahwa aliran bergerak dengan kecepatan yang lebih rendah dibandingkan sisi atas. Kondisi ini menunjukkan adanya tekanan yang lebih tinggi pada sisi bawah. Perbedaan tekanan antara kedua sisi profil menjadi semakin jelas, sehingga gaya angkat yang terbentuk cenderung meningkat. Dengan demikian, distribusi kecepatan pada kondisi ini menunjukkan bahwa *rigid sail* masih bekerja secara efektif dalam menghasilkan gaya aerodinamis.

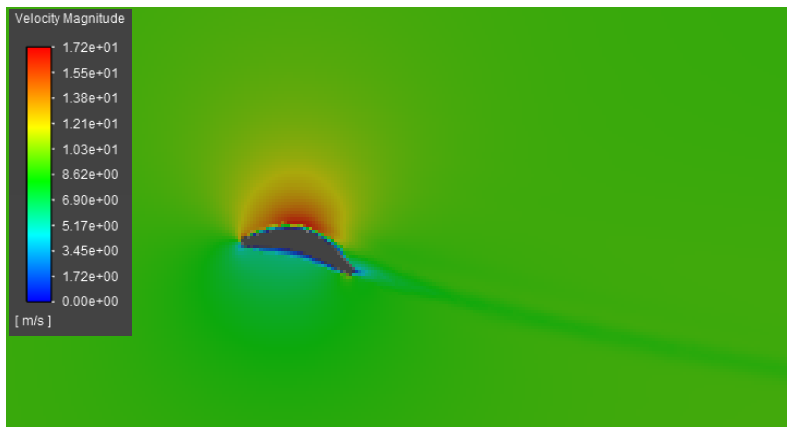
Pada bagian depan *airfoil* (*leading edge*), titik stagnasi masih dapat diamati melalui perubahan warna yang menandakan perlambatan aliran sebelum terbagi ke sisi atas dan bawah. Posisi titik stagnasi tampak sedikit lebih rendah, yang mengindikasikan bahwa sudut serang memberikan asimetris distribusi aliran yang lebih kuat dibandingkan kondisi sebelumnya. Pergeseran ini merupakan ciri meningkatnya pengaruh sudut serang terhadap pembentukan *lift*.

Di bagian belakang *airfoil* (*trailing edge*), *wake* yang terbentuk terlihat sedikit lebih panjang, namun tetap relatif tipis dan terarah. Warna hijau kebiruan pada daerah hilir menunjukkan adanya penurunan kecepatan akibat rugi energi setelah aliran melewati profil. Meskipun *wake* berkembang lebih jauh, bentuknya yang masih sempit menunjukkan bahwa hambatan aerodinamis belum meningkat secara signifikan. Dengan kata lain, efisiensi aliran masih berada pada tingkat yang baik.

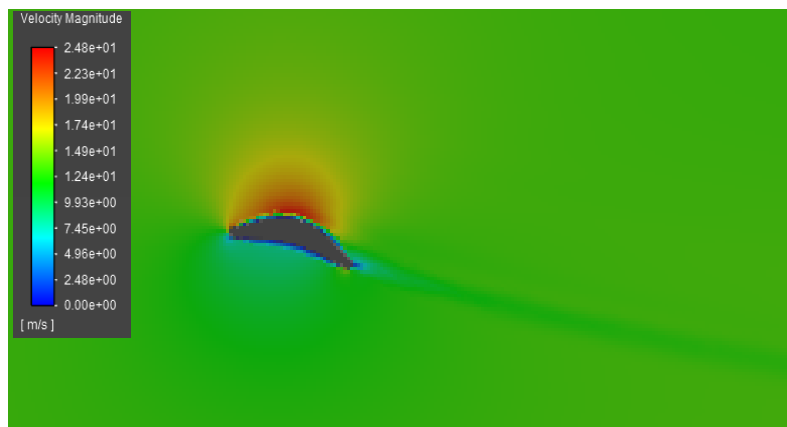
Selain itu, tidak terlihat adanya zona berkecepatan rendah yang besar ataupun pola resirkulasi yang jelas di sekitar permukaan *airfoil*. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan batas masih mampu mengikuti kontur profil secara penuh. Dengan demikian, aliran tetap berada dalam kondisi *attached flow* dan belum mengalami separasi yang berarti. Kondisi ini menandakan bahwa *airfoil* masih beroperasi di bawah batas kritis *stall*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 12 Kontur *Velocity Magnitude* Airfoil Model B Sudut Serang 15° pada Kecepatan Angin (a)12 knot; (b)18,77 knot; (c) 27 knot

Berdasarkan visualisasi kontur *Velocity Magnitude* pada gambar 4.12, distribusi kecepatan aliran di sekitar *airfoil rigid sail* menunjukkan peningkatan intensitas interaksi aerodinamika dibandingkan kondisi sebelumnya. Area aliran bebas tetap didominasi oleh warna hijau, yang menunjukkan bahwa kecepatan aliran masuk masih seragam dan stabil. Hal ini memastikan bahwa perubahan distribusi kecepatan di sekitar profil merupakan akibat langsung dari sudut serang dan bentuk geometris *airfoil*.

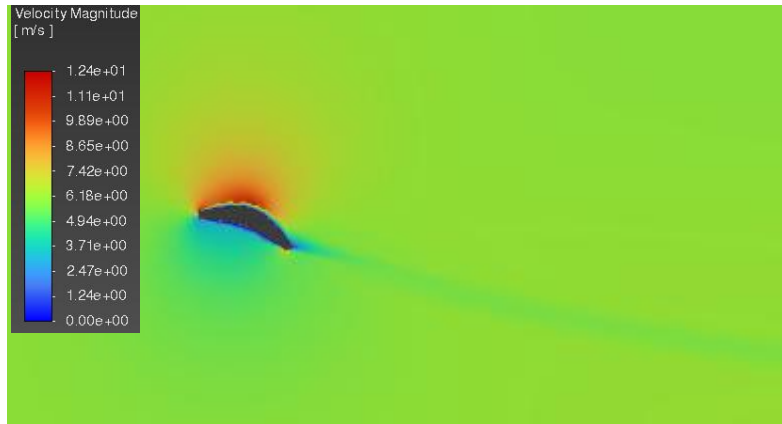
Pada sisi atas *airfoil* terlihat zona percepatan aliran yang cukup dominan, ditandai dengan warna kuning hingga merah yang menyebar di atas puncak profil. Luasan daerah berkecepatan tinggi pada kondisi ini tampak lebih berkembang, yang menandakan bahwa aliran mengalami akselerasi lebih besar saat melewati permukaan atas. Kondisi tersebut menghasilkan tekanan yang semakin rendah pada sisi atas, sehingga meningkatkan kemampuan profil dalam menghasilkan gaya angkat.

Di sisi bawah *airfoil*, warna biru tua hingga biru muda tetap menunjukkan adanya perlambatan aliran. Kecepatan yang lebih rendah pada sisi bawah berhubungan dengan tekanan yang lebih tinggi. Perbedaan tekanan antara sisi atas dan bawah menjadi semakin jelas, sehingga distribusi gaya angkat pada kondisi ini cenderung lebih besar dibandingkan sudut serang yang lebih kecil. Dengan demikian, *rigid sail* masih bekerja secara efektif dalam memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan gaya propulsif tambahan.

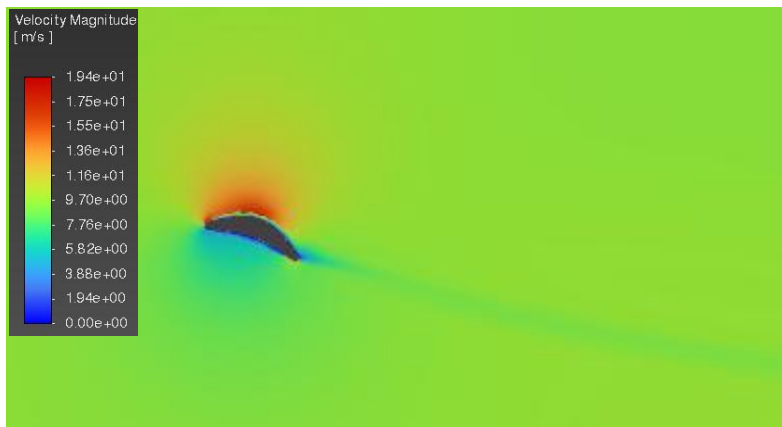
Pada bagian *leading edge*, titik stagnasi tampak sedikit bergeser ke bawah, menunjukkan bahwa asimetris distribusi aliran semakin meningkat. Pergeseran ini merupakan indikasi bahwa sudut serang memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap arah aliran. Selama pergeseran tersebut tidak menyebabkan gangguan besar pada lapisan batas, kondisi ini masih menguntungkan bagi pembentukan *lift*.

Di bagian *trailing edge*, *wake* yang terbentuk terlihat lebih panjang dibandingkan kondisi sebelumnya. Jejak aliran berwarna hijau kebiruan memanjang ke arah hilir, menunjukkan adanya rugi energi yang lebih besar setelah aliran melewati profil. Meskipun demikian, *wake* masih tergolong ramping dan tidak menunjukkan pelebaran ekstrem. Hal ini menandakan bahwa hambatan aerodinamis mulai meningkat, tetapi belum berada pada tingkat yang merugikan secara signifikan.

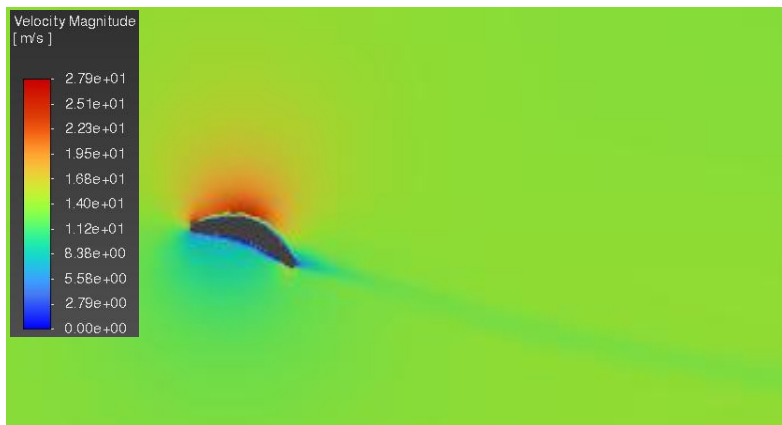
Lapisan batas di sepanjang permukaan *airfoil* masih terlihat melekat dengan baik, tanpa adanya zona resirkulasi besar maupun diskontinuitas aliran yang jelas. Hal ini menunjukkan bahwa aliran masih berada dalam kondisi *attached flow*. Dengan demikian, *airfoil* belum mengalami separasi yang signifikan dan masih beroperasi dalam rentang aerodinamika yang stabil.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 13 Kontur *Velocity Magnitude* Airfoil Model B Sudut Serang 20° pada Kecepatan Angin (a)12 knot; (b)18,77 knot; (c) 27 knot

Berdasarkan visualisasi kontur *Velocity Magnitude* pada gambar 4.13, distribusi kecepatan aliran di sekitar *airfoil rigid sail* menunjukkan kondisi aerodinamika yang sangat aktif dengan intensitas percepatan aliran yang lebih besar dibandingkan beberapa kondisi sebelumnya. Area aliran bebas tetap ditunjukkan oleh warna hijau kekuningan yang relatif seragam, menandakan bahwa kondisi masuk aliran stabil dan tidak mengalami gangguan sebelum berinteraksi dengan *airfoil*. Dengan demikian, pola distribusi yang terbentuk dapat diinterpretasikan sebagai respons langsung dari profil terhadap sudut serang yang diterapkan.

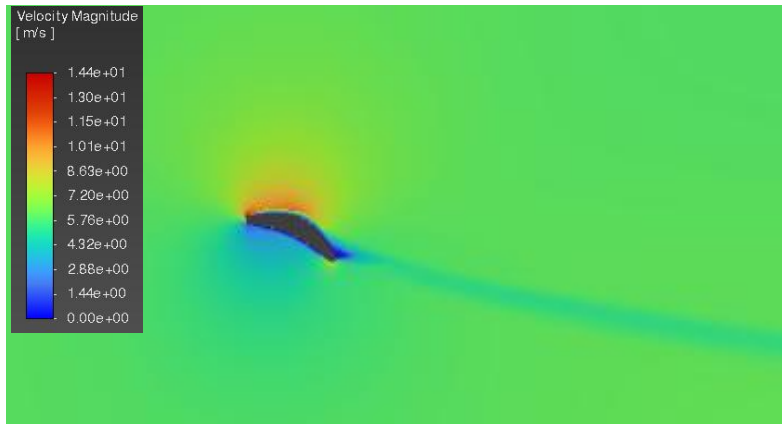
Pada sisi atas *airfoil* terlihat zona percepatan aliran yang sangat dominan, ditandai dengan warna merah pekat hingga oranye. Luasan daerah ini menunjukkan bahwa aliran udara mengalami akselerasi yang tinggi ketika melewati puncak kelengkungan profil. Percepatan tersebut berhubungan dengan penurunan tekanan statis yang signifikan pada sisi atas, sehingga menghasilkan gaya angkat yang besar. Secara aerodinamis, kondisi ini menandakan bahwa *rigid sail* bekerja sangat efektif dalam membentuk perbedaan tekanan yang diperlukan untuk menghasilkan *lift*.

Di sisi bawah *airfoil*, warna biru muda hingga sian menunjukkan adanya perlambatan aliran yang cukup jelas. Kecepatan yang lebih rendah pada sisi bawah menandakan tekanan yang lebih tinggi dibandingkan sisi atas. Perbedaan distribusi tekanan antara kedua sisi profil menjadi semakin kontras, sehingga gaya angkat yang dihasilkan cenderung meningkat. Dengan demikian, konfigurasi ini memperlihatkan kemampuan *rigid sail* dalam memanfaatkan sudut serang untuk memperbesar kontribusi aerodinamis terhadap propulsi kapal.

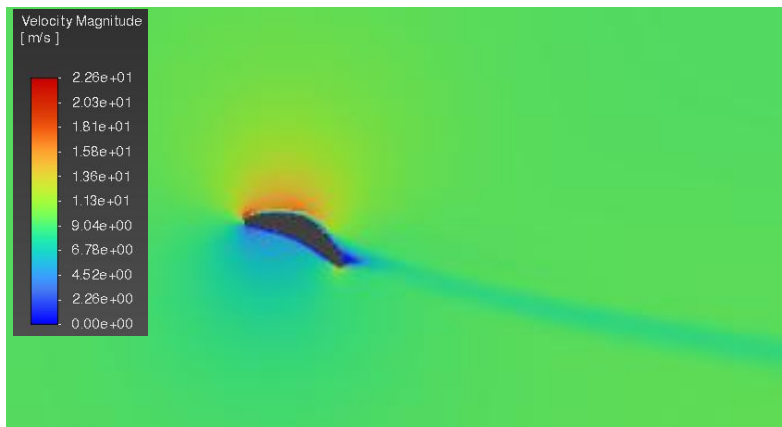
Pada bagian *leading edge*, titik stagnasi tampak semakin bergeser ke bawah. Pergeseran ini menunjukkan bahwa aliran semakin diarahkan ke sisi atas profil, yang menjadi ciri meningkatnya asimetris distribusi aliran. Selama kondisi ini tidak menyebabkan pelepasan aliran di permukaan atas, pergeseran tersebut masih mendukung peningkatan *lift*.

Di bagian *trailing edge*, *wake* yang terbentuk terlihat memanjang dengan warna biru kehijauan. Jejak aliran ini menunjukkan adanya rugi energi setelah aliran melewati profil. Dibandingkan kondisi sudut serang lebih kecil, *wake* tampak lebih jelas, yang menandakan peningkatan hambatan aerodinamis. Akan tetapi, bentuk *wake* masih relatif ramping dan terarah, sehingga kehilangan energi belum mencapai tingkat yang merugikan secara signifikan.

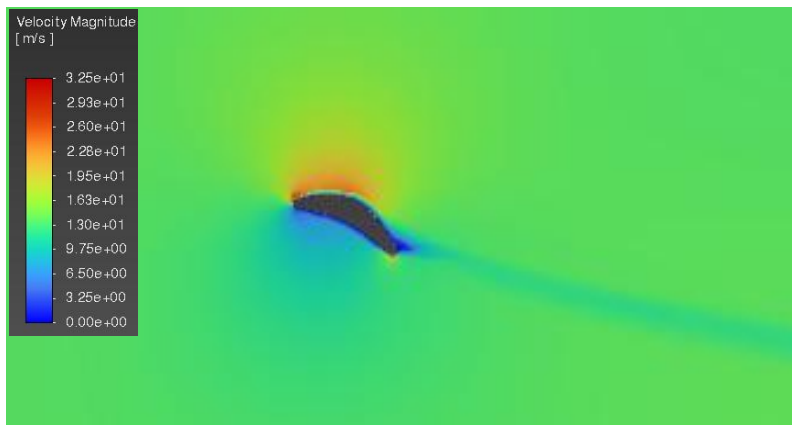
Lapisan batas pada permukaan *airfoil* masih tampak melekat dengan baik, tanpa indikasi separasi besar atau daerah resirkulasi yang dominan. Hal ini menunjukkan bahwa profil masih beroperasi dalam kondisi *attached flow*. Dengan demikian, meskipun sudut serang meningkat, *rigid sail* belum memasuki kondisi *stall* dan masih mampu mempertahankan efisiensi aerodinamis yang tinggi.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 14 Kontur *Velocity Magnitude* Airfoil Model B Sudut Serang 25° pada Kecepatan Angin (a)12 knot; (b)18,77 knot; (c) 27 knot

Berdasarkan visualisasi kontur *Velocity Magnitude* pada gambar 4.14, distribusi kecepatan aliran di sekitar *airfoil rigid sail* menunjukkan bahwa profil masih berada pada kondisi aerodinamika yang produktif, namun mulai memperlihatkan perubahan karakteristik aliran yang mengarah pada peningkatan hambatan. Secara umum, area aliran bebas tetap terlihat seragam dengan dominasi warna hijau, menandakan bahwa kondisi masuk aliran stabil dan homogen. Oleh karena itu, variasi pola di sekitar *airfoil* dapat dikaitkan langsung dengan pengaruh sudut serang terhadap distribusi aliran.

Pada sisi atas *airfoil*, zona percepatan aliran masih terlihat jelas melalui warna kuning hingga oranye. Akan tetapi, jika dibandingkan dengan kondisi sebelumnya, intensitas dan luasan area percepatan tampak sedikit berkurang. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan profil dalam mempercepat aliran di sisi atas mulai menurun. Secara aerodinamis, kondisi tersebut berkaitan dengan berkurangnya efektivitas pembentukan tekanan rendah pada sisi atas, sehingga peningkatan gaya angkat tidak lagi sebesar pada kondisi sudut serang optimal.

Di sisi bawah *airfoil*, area berwarna biru muda hingga biru tua terlihat lebih luas. Hal ini menunjukkan adanya perlambatan aliran yang lebih besar, sehingga tekanan pada sisi bawah meningkat. Walaupun peningkatan tekanan bawah masih berkontribusi terhadap *lift*, distribusi yang semakin meluas mengindikasikan bahwa pola aliran mulai mengalami ketidakseimbangan. Dengan kata lain, gaya angkat tetap terbentuk, tetapi dengan efisiensi yang lebih rendah.

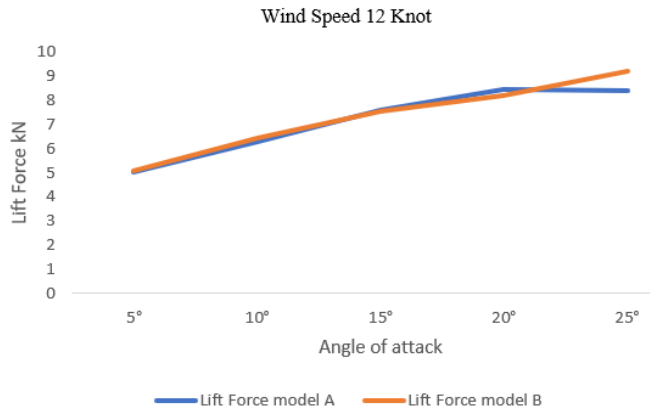
Pada bagian *leading edge*, titik stagnasi tampak semakin bergeser ke bawah, yang menunjukkan asimetris distribusi aliran semakin besar. Pergeseran ini merupakan indikasi bahwa sudut serang telah meningkat hingga mendekati batas yang mulai memengaruhi stabilitas lapisan batas. Selama aliran masih melekat pada permukaan, kondisi tersebut masih mendukung *lift*, namun risiko separasi menjadi lebih tinggi.

Perubahan yang cukup menonjol terlihat pada bagian *trailing edge* dan daerah hilir. *Wake* yang terbentuk tampak lebih panjang dan lebih tegas dibandingkan kondisi sebelumnya. Warna biru kehijauan yang memanjang menunjukkan adanya kehilangan energi aliran yang semakin besar setelah melewati profil. Hal ini menandakan peningkatan hambatan aerodinamis, khususnya *pressure drag*. Meskipun *wake* masih relatif terarah, perkembangan panjangnya menjadi indikator bahwa efisiensi mulai menurun.

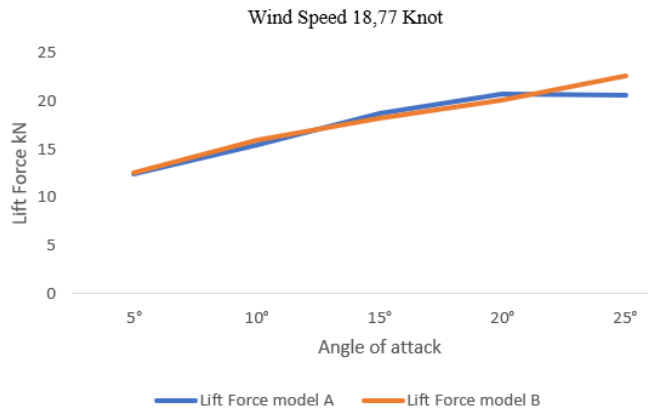
Lapisan batas di sepanjang permukaan *airfoil* masih terlihat melekat, tetapi terdapat indikasi awal penebalan pada sisi atas mendekati *trailing edge*. Fenomena ini menunjukkan bahwa gradien tekanan merugikan mulai berkembang. Walaupun belum terjadi separasi besar, kondisi ini menjadi sinyal bahwa *airfoil* sedang mendekati batas operasi optimal.

4.7 Perbandingan Peforma Aerodinamika Kedua Model *Airfoil*

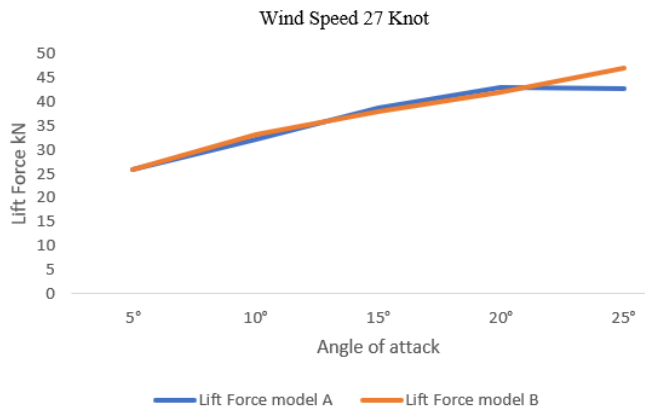
Berdasarkan keseluruhan hasil simulasi, kedua model *Airfoil* menunjukkan karakteristik aerodinamika yang berbeda, terutama dalam merespons peningkatan sudut serang. Perbedaan ini dapat diamati baik dari data yang disajikan dalam tabel maupun dari grafik hubungan antara sudut serang dan gaya angkat yang ditunjukkan pada Gambar 33, 34, dan 35 untuk masing-masing variasi kecepatan angin.



Gambar 4. 15 Grafik Perbandingan Gaya Angkat pada Kecepatan Angin 12 Knot



Gambar 4. 16 Grafik Perbandingan Gaya Angkat pada Kecepatan Angin 18,77 Knot



Gambar 4. 17 Grafik Perbandingan Gaya Angkat pada Kecepatan Angin 27 Knot

Berdasarkan grafik pada Gambar 33, 34, dan 35, dapat dilakukan analisis komparatif performa aerodinamika antara Model A dan Model B pada kecepatan angin 12 knot, 18,77 knot, dan 27 knot. Secara umum, kedua model menunjukkan pola dasar yang sama, yaitu gaya angkat meningkat seiring dengan bertambahnya sudut serang. Hal ini sesuai dengan teori aerodinamika, di mana peningkatan sudut serang akan meningkatkan perbedaan tekanan antara permukaan atas dan bawah *Airfoil*, sehingga gaya angkat bertambah.

Pada sudut serang rendah hingga menengah, yaitu pada rentang 5° hingga 15° , kedua model menunjukkan performa yang relatif serupa. Nilai gaya angkat yang dihasilkan tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi tersebut, mekanisme aliran di sekitar kedua *Airfoil* masih berada dalam kondisi stabil (*attached flow*), sehingga pengaruh perbedaan geometri belum terlalu dominan terhadap distribusi tekanan dan gaya angkat.

Perbedaan performa mulai terlihat jelas ketika sudut serang meningkat ke 20° dan 25° . Pada rentang ini, Model B secara konsisten menghasilkan gaya angkat yang lebih besar dibandingkan Model A pada semua variasi kecepatan angin. Fenomena ini menunjukkan bahwa Model B memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan efisiensi aerodinamika pada sudut serang tinggi.

Pada sudut serang 25° , Model A cenderung mengalami penurunan atau stagnasi gaya angkat. Kondisi ini merupakan indikasi terjadinya *aerodynamic stall*, di mana aliran udara pada permukaan atas *Airfoil* mengalami separasi akibat meningkatnya *adverse pressure gradient*. Separasi ini menyebabkan berkurangnya daerah tekanan rendah pada permukaan atas, sehingga selisih tekanan menurun dan gaya angkat berkurang.

Sebaliknya, Model B masih menunjukkan peningkatan gaya angkat pada sudut serang 25° . Hal ini mengindikasikan bahwa aliran udara pada permukaan *Airfoil* masih mampu melekat dengan baik (*attached flow*), sehingga separasi aliran belum terjadi secara signifikan. Dengan demikian, Model B memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menunda terjadinya *stall* (*delayed stall*), yang menjadi salah satu keunggulan utama dalam performa aerodinamika.

Perbedaan karakteristik ini juga semakin terlihat jelas pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Pada kecepatan 27 knot, selisih gaya angkat antara Model A dan Model B menjadi lebih besar dibandingkan pada kecepatan yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa Model B tidak hanya mampu mempertahankan aliran pada sudut serang tinggi, tetapi juga lebih efektif dalam memanfaatkan peningkatan energi aliran untuk menghasilkan gaya angkat yang lebih besar.

Secara teoritis, peningkatan kecepatan aliran akan meningkatkan bilangan Reynolds, yang berpengaruh terhadap karakteristik lapisan batas. Pada Model B, peningkatan bilangan Reynolds kemungkinan menyebabkan lapisan batas menjadi lebih turbulen, sehingga memiliki energi kinetik yang lebih besar untuk melawan *adverse pressure gradient*. Akibatnya, separasi aliran dapat ditunda, dan gaya angkat tetap meningkat meskipun sudut serang tinggi.

Sebaliknya, pada Model A, meskipun kecepatan meningkat, separasi aliran tetap terjadi pada sudut serang tertentu, sehingga gaya angkat tidak dapat meningkat lebih lanjut. Hal ini menunjukkan bahwa geometri Model A kurang optimal dalam mengontrol distribusi tekanan dan perkembangan lapisan batas pada kondisi ekstrem.

Dari sudut pandang desain, perbedaan ini mengindikasikan bahwa Model B memiliki distribusi tekanan yang lebih stabil dan gradien tekanan yang lebih landai pada

permukaan atas *Airfoil*. Kondisi ini memungkinkan aliran untuk tetap melekat lebih lama, sehingga meningkatkan efisiensi aerodinamika pada sudut serang tinggi.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa meskipun kedua model memiliki karakteristik yang serupa pada sudut serang rendah hingga menengah, Model B menunjukkan performa yang lebih unggul pada sudut serang tinggi. Keunggulan ini ditandai dengan kemampuan untuk mempertahankan peningkatan gaya angkat tanpa mengalami *stall* dalam rentang sudut yang diuji.

Dengan demikian, Model B memiliki kelebihan dalam hal kestabilan aliran, kemampuan menunda separasi, serta efisiensi dalam memanfaatkan energi angin, terutama pada kondisi kecepatan tinggi. Hal ini menjadikan Model B lebih potensial untuk diaplikasikan pada sistem yang membutuhkan performa aerodinamika yang stabil dan adaptif terhadap perubahan kondisi operasi.

4.8 Perhitungan Hambatan Kapal

Hambatan kapal merupakan salah satu parameter penting dalam analisis performa kapal karena berkaitan langsung dengan kebutuhan daya mesin untuk menggerakkan kapal pada kecepatan tertentu. Secara umum, hambatan kapal dapat dihitung melalui berbagai metode, seperti metode empiris, eksperimen model di *towing tank*, maupun simulasi numerik menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Metode-metode tersebut digunakan untuk memperoleh estimasi hambatan kapal yang akurat sehingga dapat diketahui kebutuhan daya propulsi kapal pada kondisi operasi tertentu.

Namun, dalam beberapa kondisi, hambatan kapal juga dapat diperkirakan melalui pendekatan perhitungan terbalik (*reverse calculation*) apabila daya mesin utama yang terpasang pada kapal telah diketahui. Pendekatan ini didasarkan pada hubungan antara daya efektif kapal, efisiensi sistem propulsi, serta kecepatan kapal. Dengan mengetahui daya mesin yang tersedia dan mempertimbangkan efisiensi propulsi kapal, maka besar hambatan total kapal dapat diestimasi secara matematis.

Pada penelitian ini, perhitungan hambatan kapal dilakukan dengan menggunakan pendekatan tersebut, yaitu dengan memanfaatkan data daya mesin utama kapal yang telah diketahui. Proses perhitungan dilakukan secara bertahap mulai dari *Brake Horse Power Maximum Continuous Rating* (BHPMCR) hingga diperoleh *Effective Horse Power* (EHP) yang selanjutnya digunakan untuk menentukan hambatan total kapal.

Daya mesin utama yang terpasang pada kapal adalah sebesar 811 HP untuk setiap mesin dengan konfigurasi *twin screw*, sehingga total daya mesin yang tersedia dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{BHPMCR} &= \text{Daya mesin yang terpasang} \\ &= 811 \times 2 \\ &= 1622 \text{ HP} \\ &= 1210 \text{ kW}\end{aligned}$$

Selanjutnya dihitung *Brake Horse Power Service Continuous Rating* (BHPSCR) yang umumnya diasumsikan sebesar 80% dari BHPMCR, yaitu:

$$\begin{aligned}\text{BHPSCR} &= 80\% \times \text{BHPMCR} \\ &= 80\% \times 1622 \text{ HP} \\ &= 1297,6 \text{ HP} \\ &= 967,64 \text{ kW}\end{aligned}$$

Nilai tersebut kemudian dikonversikan menjadi *Shaft Horse Power* (SHP) dengan mempertimbangkan efisiensi *gearbox* (η_G):

$$\begin{aligned}\text{SHP} &= \text{BHPSCr} \times \eta_G \\ &= 1297,6 \times 0,98 \\ &= 1271,648 \text{ HP}\end{aligned}$$

Selanjutnya dihitung *Delivered Horse Power* (DHP) dengan memperhitungkan efisiensi shaft (η_S):

$$\begin{aligned}\text{DHP} &= \text{SHP} \times \eta_S \\ &= 1271,648 \times 0,98 \\ &= 1246,215 \text{ HP}\end{aligned}$$

Untuk memperoleh *Effective Horse Power* (EHP), nilai DHP dikalikan dengan *Propulsive Coefficient* (PC) yang merupakan hasil perkalian dari *hull efficiency* (η_H), *relative rotative efficiency* (η_R), dan *open water efficiency* (η_O).

$$\text{PC} = \eta_H \times \eta_R \times \eta_O$$

Efisiensi lambung dihitung menggunakan hubungan berikut:

$$\eta_H = (1-t) / (1-W)$$

Di mana t merupakan *thrust deduction factor* dan W merupakan *wake fraction*. Untuk kapal dengan konfigurasi *twin screw*, nilai *thrust deduction factor* dapat dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned}t &= 0,5 \times C_p - 0,19 \\ &= 0,5 \times 0,867 - 0,19 \\ &= 0,2435\end{aligned}$$

Sedangkan *wake fraction* dihitung dengan persamaan:

$$W = 0,7 \times C_p - 0,3 + 0,3 (0,4 - a/b)$$

dengan:

$$a = \text{jarak antar dua poros (10m)}$$

$$b = \text{lebar kapal (20 m)}$$

Sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned}W &= 0,7 \times C_p - 0,3 + 0,3 \times (0,4 - a/b) \\ &= 0,7 \times 0,867 - 0,3 + 0,3 \times (0,4 - 10/20) \\ &= 0,2769\end{aligned}$$

Dengan demikian efisiensi lambung dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\eta_H &= (1-t) / (1-W) \\ &= 1 - 0,2435 / 1 - 0,2769 \\ &= 1,046\end{aligned}$$

Relative rotative efficiency diasumsikan sebesar:

$$\begin{aligned}\eta_R &= \text{Relative rotative efficiency} \\ &= 1\end{aligned}$$

Sedangkan *open water efficiency* diambil sebesar:

$$\begin{aligned}\eta_O &= \text{Efficiency open water} \\ &= 0,55 - 0,6 \\ &= 0,6\end{aligned}$$

Sehingga nilai *Propulsive Coefficient* (PC) adalah:

$$\begin{aligned} \text{PC} &= \eta_H \times \eta_R \times \eta_O \\ &= 1,046 \times 1 \times 0,6 \\ &= 0,627 \end{aligned}$$

Nilai tersebut kemudian digunakan untuk menghitung *Effective Horse Power* (EHP):

$$\begin{aligned} \text{EHP} &= \text{DHP} \times \text{PC} \\ &= 1246,215 \text{ Hp} \times 0,627 \\ &= 782,2666 \text{ HP} \\ &= 583,3457 \text{ Kw} \end{aligned}$$

Berdasarkan nilai EHP yang diperoleh, hambatan total kapal dapat dihitung menggunakan hubungan antara daya efektif dan kecepatan kapal, yaitu:

$$\begin{aligned} \text{RT} &= \text{EHP} / V_s \\ &= 583,3457 \text{ (Kw)} / 4,11 \text{ m/s} \\ &= 141,75 \text{ kN} \end{aligned}$$

dengan:

$$\begin{aligned} \text{RT} &= \text{hambatan total kapal (kN)} \\ \text{EHP} &= \text{daya efektif kapal (kW)} \\ V_s &= \text{kecepatan kapal (m/s)} \end{aligned}$$

Dengan demikian, berdasarkan perhitungan menggunakan metode *reverse calculation*, diperoleh bahwa hambatan total kapal pada kecepatan 4,11 m/s (8 knot) adalah sebesar 141,75 kN.

4.9 Analisis Pengaruh *Rigid sail* terhadap Kebutuhan Daya Mesin Kapal

Berdasarkan hasil simulasi aerodinamika yang telah dilakukan, kedua model *rigid sail* menunjukkan karakteristik kemampuan menghasilkan gaya angkat yang berbeda pada setiap variasi sudut serang dan kecepatan angin. Perbedaan karakteristik tersebut tidak hanya mencerminkan performa aerodinamika masing-masing model, tetapi juga berimplikasi langsung terhadap besarnya gaya dorong tambahan yang dapat dimanfaatkan dalam sistem *Wind Assisted Propulsion System* (WAPS) pada kapal.

Untuk memperoleh hasil analisis yang komprehensif dan representatif terhadap kondisi operasional kapal di laut, evaluasi dilakukan pada tiga variasi kecepatan angin, yaitu kecepatan rendah, kecepatan rata-rata, dan kecepatan tinggi. Pendekatan ini mempertimbangkan sifat kecepatan angin yang dinamis dan fluktuatif selama pelayaran, sehingga analisis yang dilakukan tidak terbatas pada satu kondisi tertentu. Oleh karena itu, perhitungan pengaruh *rigid sail* terhadap hambatan kapal dan kebutuhan daya mesin utama dilakukan pada seluruh variasi kecepatan angin tersebut.

Gaya angkat yang dihasilkan oleh masing-masing model *rigid sail* selanjutnya dikonversikan menjadi gaya dorong tambahan yang berkontribusi dalam mengurangi hambatan total kapal. Penurunan hambatan total ini menyebabkan berkurangnya hambatan efektif yang harus diatasi oleh sistem propulsi, sehingga secara langsung berdampak pada penurunan kebutuhan daya mesin utama.

4.9.1 Perhitungan Daya Mesin Setelah Dipasang *Rigid sail* Model A

Perhitungan kebutuhan daya mesin setelah pemasangan *rigid sail* Model A dilakukan pada tiga variasi kecepatan angin. Gaya angkat yang dihasilkan pada masing-masing kondisi digunakan sebagai gaya dorong tambahan untuk

menghitung hambatan efektif kapal. Untuk hasil gaya angkat yang digunakan merupakan hasil simulasi pada sudut serang 20° karena pada sudut tersebut menghasilkan daya angkat tertinggi untuk model A pada setiap kecepatan

A. Pada Kecepatan Angin 12 Knot

$$RT_{new} = RT - F_{sail}$$

Di mana:

$$RT_{new} = \text{Hambatan kapal setelah dipasang } rigid \text{ sail (kN)}$$

$$RT = \text{Hambatan total kapal tanpa } rigid \text{ sail (kN)}$$

$$F_{sail} = \text{Gaya dorong yang dihasilkan oleh } rigid \text{ sail (kN)}$$

Sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned} RT_{new} &= 141,75 \text{ kN} - 8,43 \text{ kN} \\ &= 133,33 \text{ kN} \end{aligned}$$

Selanjutnya, kebutuhan daya mesin kapal setelah dipasang *rigid sail* dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} EHP &= RT \times V_s \\ &= 133,33 \times 4,11 \\ &= 548,67 \text{ kW} \\ &= 735,77 \text{ HP} \end{aligned}$$

Nilai *Effective Horse Power* (EHP) tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung *Delivered Horse Power* (DHP) dengan mempertimbangkan nilai *Propulsive Coefficient* (PC). Perhitungan dilakukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} DHP &= EHP / PC \\ &= 735,77 / 0,627 \\ &= 1172,15 \text{ Hp} \end{aligned}$$

Selanjutnya dihitung nilai *Shaft Horse Power* (SHP) dengan mempertimbangkan efisiensi *shaft* (η_S):

$$\begin{aligned} SHP &= DHP / \eta_S \\ &= 1172,15 / 0,98 \\ &= 1196,07 \text{ HP} \end{aligned}$$

Tahap berikutnya adalah menghitung *Brake Horse Power Service Continuous Rating* (BHPSCr) dengan memperhitungkan efisiensi *gearbox* (η_G) sebesar 0,98:

$$\begin{aligned} BHPSCr &= SHP / \eta_G \\ &= 1196,07 / 0,98 \\ &= 1220,48 \text{ HP} \\ &= 910,12 \text{ kW} \end{aligned}$$

B. Pada Kecepatan Angin 18,77 Knot

$$RT_{new} = RT - F_{sail}$$

Di mana:

$$RT_{new} = \text{Hambatan kapal setelah dipasang } rigid \text{ sail (kN)}$$

$$RT = \text{Hambatan total kapal tanpa } rigid \text{ sail (kN)}$$

$$F_{sail} = \text{Gaya dorong yang dihasilkan oleh } rigid \text{ sail (kN)}$$

Sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned}RT_{new} &= 141,75 \text{ kN} - 20,77 \text{ kN} \\ &= 120,99 \text{ kN}\end{aligned}$$

Selanjutnya, kebutuhan daya mesin kapal setelah dipasang *rigid sail* dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{EHP} &= RT \times V_s \\ &= 120,99 \times 4,11 \\ &= 497,88 \text{ kW} \\ &= 667,65 \text{ HP}\end{aligned}$$

Nilai *Effective Horse Power* (EHP) tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung *Delivered Horse Power* (DHP) dengan mempertimbangkan nilai *Propulsive Coefficient* (PC). Perhitungan dilakukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{DHP} &= \text{EHP} / \text{PC} \\ &= 667,65 / 0,627 \\ &= 1063,63 \text{ HP}\end{aligned}$$

Selanjutnya dihitung nilai *Shaft Horse Power* (SHP) dengan mempertimbangkan efisiensi *shaft* (η_S):

$$\begin{aligned}\text{SHP} &= \text{DHP} / \eta_S \\ &= 1063,63 / 0,98 \\ &= 1085,33 \text{ HP}\end{aligned}$$

Tahap berikutnya adalah menghitung *Brake Horse Power Service Continuous Rating* (BHPSCr) dengan memperhitungkan efisiensi *gearbox* (η_G) sebesar 0,98:

$$\begin{aligned}\text{BHPSCr} &= \text{SHP} / \eta_G \\ &= 1085,33 / 0,98 \\ &= 1107,48 \text{ HP} \\ &= 825,86 \text{ kW}\end{aligned}$$

C. Pada Kecepatan Angin 27 Knot

$$RT_{new} = RT - F_{sail}$$

Di mana:

$$\begin{aligned}RT_{new} &= \text{Hambatan kapal setelah dipasang } rigid \text{ sail (kN)} \\ RT &= \text{Hambatan total kapal tanpa } rigid \text{ sail (kN)} \\ F_{sail} &= \text{Gaya dorong yang dihasilkan oleh } rigid \text{ sail (kN)}\end{aligned}$$

Sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned}RT_{new} &= 141,75 \text{ kN} - 22,66 \text{ kN} \\ &= 98,80 \text{ kN}\end{aligned}$$

Selanjutnya, kebutuhan daya mesin kapal setelah dipasang *rigid sail* dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{EHP} &= RT \times V_s \\ &= 98,80 \times 4,11 \\ &= 406,59 \text{ kW} \\ &= 545,24 \text{ HP}\end{aligned}$$

Nilai *Effective Horse Power* (EHP) tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung *Delivered Horse Power* (DHP) dengan mempertimbangkan nilai *Propulsive Coefficient* (PC). Perhitungan dilakukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{DHP} &= \text{EHP} / \text{PC} \\ &= 545,24 / 0,627 \\ &= 868,62 \text{ HP} \end{aligned}$$

Selanjutnya dihitung nilai *Shaft Horse Power* (SHP) dengan mempertimbangkan efisiensi *shaft* (η_S):

$$\begin{aligned} \text{SHP} &= \text{DHP} / \eta_S \\ &= 868,62 / 0,98 \\ &= 886,34 \text{ HP} \end{aligned}$$

Tahap berikutnya adalah menghitung *Brake Horse Power Service Continuous Rating* (BHPSCr) dengan memperhitungkan efisiensi *gearbox* (η_G) sebesar 0,98:

$$\begin{aligned} \text{BHPSCr} &= \text{SHP} / \eta_G \\ &= 886,34 / 0,98 \\ &= 904,43 \text{ HP} \\ &= 674,45 \text{ Kw} \end{aligned}$$

4.9.2 Perhitungan Daya Mesin Setelah Dipasang *Rigid sail* Model B

Perhitungan pada Model B dilakukan dengan prosedur yang sama seperti Model A, namun menggunakan nilai gaya angkat hasil simulasi Model B.

A. Pada Kecepatan Angin 12 Knot

$$\begin{aligned} \text{RT}_{\text{new}} &= \text{RT} - F_{\text{sail}} \\ \text{Di mana:} \\ \text{RT}_{\text{new}} &= \text{Hambatan kapal setelah dipasang } \textit{rigid sail} \text{ (kN)} \\ \text{RT} &= \text{Hambatan total kapal tanpa } \textit{rigid sail} \text{ (kN)} \\ F_{\text{sail}} &= \text{Gaya dorong yang dihasilkan oleh } \textit{rigid sail} \text{ (kN)} \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned} \text{RT}_{\text{new}} &= 141,75 \text{ kN} - 9,18 \text{ kN} \\ &= 132,57 \text{ kN} \end{aligned}$$

Selanjutnya, kebutuhan daya mesin kapal setelah dipasang *rigid sail* dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{EHP} &= \text{RT} \times V_s \\ &= 132,57 \times 4,11 \\ &= 545,55 \text{ kW} \\ &= 731,58 \text{ HP} \end{aligned}$$

Nilai *Effective Horse Power* (EHP) tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung *Delivered Horse Power* (DHP) dengan mempertimbangkan nilai *Propulsive Coefficient* (PC). Perhitungan dilakukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{DHP} &= \text{EHP} / \text{PC} \\ &= 731,58 / 0,627 \\ &= 1165,47 \text{ HP} \end{aligned}$$

Selanjutnya dihitung nilai *Shaft Horse Power* (SHP) dengan mempertimbangkan efisiensi *shaft* (η_S):

$$\begin{aligned}\text{SHP} &= \text{DHP} / \eta_S \\ &= 1165,47 / 0,98 \\ &= 1189,26 \text{ HP}\end{aligned}$$

Tahap berikutnya adalah menghitung *Brake Horse Power Service Continuous Rating* (BHPSCr) dengan memperhitungkan efisiensi *gearbox* (η_G) sebesar 0,98:

$$\begin{aligned}\text{BHPSCr} &= \text{SHP} / \eta_G \\ &= 1189,26 / 0,98 \\ &= 1213,53 \text{ HP} \\ &= 904,94 \text{ kW}\end{aligned}$$

B. Pada Kecepatan Angin 18,77 Knot

$$\text{RT}_{\text{new}} = \text{RT} - F_{\text{sail}}$$

Di mana:

$$\begin{aligned}\text{RT}_{\text{new}} &= \text{Hambatan kapal setelah dipasang rigid sail (kN)} \\ \text{RT} &= \text{Hambatan total kapal tanpa rigid sail (kN)} \\ F_{\text{sail}} &= \text{Gaya dorong yang dihasilkan oleh rigid sail (kN)}\end{aligned}$$

Sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned}\text{RT}_{\text{new}} &= 141,75 \text{ kN} - 22,66 \text{ kN} \\ &= 119,09 \text{ kN}\end{aligned}$$

Selanjutnya, kebutuhan daya mesin kapal setelah dipasang *rigid sail* dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{EHP} &= \text{RT} \times V_s \\ &= 119,09 \times 4,11 \\ &= 490,10 \text{ kW} \\ &= 657,22 \text{ HP}\end{aligned}$$

Nilai *Effective Horse Power* (EHP) tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung *Delivered Horse Power* (DHP) dengan mempertimbangkan nilai *Propulsive Coefficient* (PC). Perhitungan dilakukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{DHP} &= \text{EHP} / \text{PC} \\ &= 657,22 / 0,627 \\ &= 1047,01 \text{ HP}\end{aligned}$$

Selanjutnya dihitung nilai *Shaft Horse Power* (SHP) dengan mempertimbangkan efisiensi *shaft* (η_S):

$$\begin{aligned}\text{SHP} &= \text{DHP} / \eta_S \\ &= 1047,01 / 0,98 \\ &= 1068,38 \text{ HP}\end{aligned}$$

Tahap berikutnya adalah menghitung *Brake Horse Power Service Continuous Rating* (BHPSCr) dengan memperhitungkan efisiensi *gearbox* (η_G) sebesar 0,98:

$$\begin{aligned}
\text{BHPSCr} &= \text{SHP} / \eta_G \\
&= 1068,38 / 0,98 \\
&= 1090,18 \text{ HP} \\
&= 812,96 \text{ kW}
\end{aligned}$$

C. Pada Kecepatan Angin 27 Knot

$$\begin{aligned}
RT_{new} &= RT - F_{sail} \\
\text{Di mana:} \\
RT_{new} &= \text{Hambatan kapal setelah dipasang } rigid \text{ sail (kN)} \\
RT &= \text{Hambatan total kapal tanpa } rigid \text{ sail (kN)} \\
F_{sail} &= \text{Gaya dorong yang dihasilkan oleh } rigid \text{ sail (kN)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Sehingga diperoleh:} \\
RT_{new} &= 141,75 \text{ kN} - 46,91 \text{ kN} \\
&= 94,85 \text{ kN}
\end{aligned}$$

Selanjutnya, kebutuhan daya mesin kapal setelah dipasang *rigid sail* dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\text{EHP} &= RT \times V_s \\
&= 94,85 \times 4,11 \\
&= 390,32 \text{ kW} \\
&= 523,41 \text{ HP}
\end{aligned}$$

Nilai *Effective Horse Power* (EHP) tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung *Delivered Horse Power* (DHP) dengan mempertimbangkan nilai *Propulsive Coefficient* (PC). Perhitungan dilakukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\text{DHP} &= \text{EHP} / \text{PC} \\
&= 523,41 / 0,627 \\
&= 833,83 \text{ HP}
\end{aligned}$$

Selanjutnya dihitung nilai *Shaft Horse Power* (SHP) dengan mempertimbangkan efisiensi *shaft* (η_S):

$$\begin{aligned}
\text{SHP} &= \text{DHP} / \eta_S \\
&= 833,83 / 0,98 \\
&= 850,86 \text{ HP}
\end{aligned}$$

Tahap berikutnya adalah menghitung *Brake Horse Power Service Continuous Rating* (BHPSCr) dengan memperhitungkan efisiensi *gearbox* (η_G) sebesar 0,98:

$$\begin{aligned}
\text{BHPSCr} &= \text{SHP} / \eta_G \\
&= 850,86 / 0,98 \\
&= 868,22 \text{ HP} \\
&= 647,44 \text{ Kw}
\end{aligned}$$

4.9.3 Hasil Perhitungan Daya Mesin Ketika Dipasang *Rigid sail*

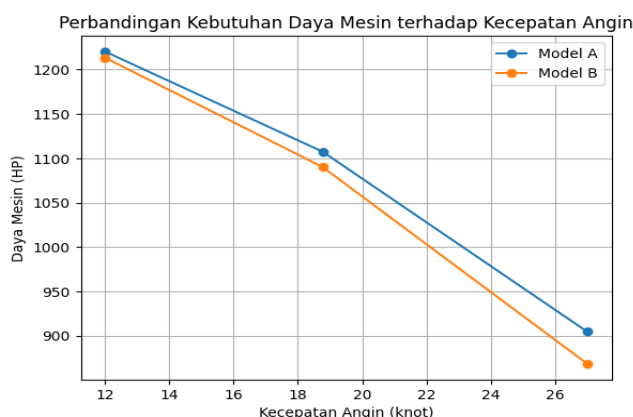
Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan pada Subbab 4.9.1 dan Subbab 4.9.2, diperoleh nilai kebutuhan daya mesin kapal setelah pemasangan *rigid sail* untuk masing-masing model pada berbagai variasi kecepatan angin. Rekapitulasi hasil perhitungan tersebut disajikan secara sistematis pada Tabel 4.9 dalam satuan *horsepower* (HP) dan kilowatt (kW).

Tabel 4. 10 Hasil Perhitungan Daya Mesin Ketika dipasang *rigid sail*

Kecepatan Angin	Model A (HP)	Model A (kW)	Model B (HP)	Model B (kW)
12 Knot	1220,48	910,12	1213,53	904,94
18,77 Knot	1107,48	825,86	1090,18	812,96
27 Knot	904,43	674,45	868,22	647,44

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.10, terlihat adanya kecenderungan perubahan kebutuhan daya mesin kapal seiring dengan variasi kecepatan angin dan perbedaan model *rigid sail* yang digunakan. Secara umum, peningkatan kecepatan angin diikuti oleh penurunan kebutuhan daya mesin pada kedua model, yang menunjukkan adanya kontribusi positif dari sistem *Wind Assisted Propulsion System* (WAPS) terhadap kinerja propulsi kapal.

Selain pengaruh kecepatan angin, perbedaan desain geometris antara Model A dan Model B juga memberikan kontribusi terhadap variasi kebutuhan daya mesin. Model dengan karakteristik aerodinamika yang lebih baik akan menghasilkan koefisien gaya angkat yang lebih tinggi, sehingga mampu memberikan tambahan gaya dorong yang lebih besar pada kondisi operasional yang sama. Hal ini berdampak langsung pada penurunan nilai hambatan efektif kapal, yang kemudian berimplikasi pada penurunan kebutuhan daya mesin.



Gambar 4. 18 Grafik Perbandingan Kebutuhan Daya mesin terhadap kecepatan Angin

Model B secara konsisten menunjukkan nilai daya mesin yang lebih rendah dibandingkan Model A pada seluruh variasi kecepatan angin seperti yang di tunjukan pada Gambar. Hal ini menunjukkan bahwa Model B memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menghasilkan gaya dorong tambahan, sehingga mampu mengurangi beban kerja mesin utama secara lebih optimal. Dengan kata lain, Model B memiliki tingkat efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan Model A.

Perbedaan performa ini semakin terlihat pada kondisi kecepatan angin yang lebih tinggi. Pada kondisi tersebut, kontribusi gaya aerodinamis dari *rigid sail*

menjadi lebih dominan, sehingga keunggulan desain yang mampu menghasilkan gaya angkat lebih besar akan memberikan dampak yang lebih signifikan terhadap penurunan kebutuhan daya mesin. Dengan demikian, Model B dapat dikatakan memiliki sensitivitas yang lebih baik terhadap peningkatan energi angin yang tersedia.

4.10 Analisis Penghematan Bahan Bakar

Salah satu tujuan utama penerapan *rigid sail* sebagai bagian dari sistem *Wind Assisted Propulsion System* (WAPS) adalah untuk memanfaatkan energi angin sebagai sumber gaya dorong tambahan bagi kapal. Gaya dorong tambahan tersebut dapat membantu mengurangi beban kerja mesin utama dalam mengatasi hambatan kapal selama pelayaran. Dengan berkurangnya beban kerja mesin, maka kebutuhan daya propulsi kapal juga akan menurun. Penurunan kebutuhan daya mesin ini secara langsung berdampak pada berkurangnya konsumsi bahan bakar selama operasi kapal.

Penurunan kebutuhan daya mesin tersebut menunjukkan bahwa *rigid sail* mampu mengurangi beban kerja sistem propulsi kapal secara signifikan. Hal ini terjadi karena sebagian hambatan total kapal dapat diimbangi oleh gaya dorong tambahan yang dihasilkan dari interaksi antara aliran angin dan permukaan *Airfoil rigid sail*.

Untuk mengetahui besarnya potensi penghematan bahan bakar yang dihasilkan akibat penurunan kebutuhan daya mesin kapal, maka dilakukan perhitungan konsumsi bahan bakar berdasarkan nilai *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC) dari mesin utama kapal. Perhitungan ini bertujuan untuk mengestimasi jumlah bahan bakar yang dapat dihemat setelah penerapan *rigid sail* sebagai sistem *Wind Assisted Propulsion System*. Sesuai dengan spesifikasi mesin yang dipakai nilai SFOC_{me} untuk 1 mesin yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{SFOC}_{me} &= \text{Fuel Cons L per jam} / \text{Daya Mesin} \\ &= 108 \text{ L/h} / 605 \text{ kW} \\ &= 0,179 \text{ L/kWh}\end{aligned}$$

Karena kapal menggunakan sistem propulsi *twin screw*, maka nilai *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC_{me}) yang digunakan dalam perhitungan merupakan total konsumsi bahan bakar dari kedua mesin utama yang bekerja secara bersamaan untuk menghasilkan daya propulsi kapal, menjadi 2 x SFOC_{me} yaitu 0,358

Dalam penelitian ini, perhitungan kebutuhan bahan bakar dalam 1 hari dapat dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{FC} = \text{SFOC}_{me} \times \text{BHPSCr} \times 24$$

Di mana:

$$\begin{aligned}\text{FC} &= \text{Full Consumption} \\ \text{SFOC}_{me} &= \text{Specific Fuel Oil Consumption} \\ \text{BHPSCr} &= \text{Daya mesin dalam kW}\end{aligned}$$

Untuk menghitung konsumsi bahan bakar sebelum dipasang *rigid sail* yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{FC} &= \text{SFOCme} \times \text{BHPSCr} \times 24 \\ &= 0,358 \times 967,64 \times 24 \\ &= 346,42 \times 24 \\ &= 8314,08 \text{ L / Hari}\end{aligned}$$

Untuk menghitung konsumsi bahan bakar setelah dipasang *rigid sail* model A pada kecepatan angin 12 Knot yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{FC} &= \text{SFOCme} \times \text{BHPSCr2} \times 24 \\ &= 0,358 \times 910,12 \times 24 \\ &= 325,82 \times 24 \\ &= 7819,68 \text{ L / Hari}\end{aligned}$$

Untuk menghitung konsumsi bahan bakar setelah dipasang *rigid sail* model A pada kecepatan angin 18,77 Knot yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{FC} &= \text{SFOCme} \times \text{BHPSCr2} \times 24 \\ &= 0,358 \times 825,86 \times 24 \\ &= 295,66 \times 24 \\ &= 7095,84 \text{ L / Hari}\end{aligned}$$

Untuk menghitung konsumsi bahan bakar setelah dipasang *rigid sail* model A pada kecepatan angin 27 Knot yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{FC} &= \text{SFOCme} \times \text{BHPSCr2} \times 24 \\ &= 0,358 \times 674,45 \times 24 \\ &= 241,45 \times 24 \\ &= 5794,80 \text{ L / Hari}\end{aligned}$$

Untuk menghitung konsumsi bahan bakar setelah dipasang *rigid sail* model B pada kecepatan angin 12 Knot yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{FC} &= \text{SFOCme} \times \text{BHPSCr2} \times 24 \\ &= 0,358 \times 904,94 \times 24 \\ &= 323,97 \times 24 \\ &= 7775,28 \text{ L / Hari}\end{aligned}$$

Untuk menghitung konsumsi bahan bakar setelah dipasang *rigid sail* model B pada kecepatan angin 18,77 Knot yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{FC} &= \text{SFOCme} \times \text{BHPSCr2} \times 24 \\ &= 0,358 \times 812,96 \times 24 \\ &= 291,03 \times 24 \\ &= 6984,78 \text{ L / Hari}\end{aligned}$$

Untuk menghitung konsumsi bahan bakar setelah dipasang *rigid sail* model B pada kecepatan angin 27 Knot yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{FC} &= \text{SFOCme} \times \text{BHPSCr2} \times 24 \\ &= 0,358 \times 647,44 \times 24 \\ &= 231,38 \times 24 \\ &= 5553,12 \text{ L / Hari}\end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan konsumsi, diperoleh konsumsi bahan bakar sebagai berikut:

Tabel 4. 11 Konsumsi Bahan Bakar Kapal

Model <i>Rigid sail</i> dan Kecepatan Angin	Konsumsi bahan bakar Liter per Hari	Konsumsi bahan bakar Liter per tahun	Konsumsi bahan bakar ton per tahun	Penghematan (%)
Tanpa <i>Rigid sail</i>	8314,08	3.034.639	2.882,91	-
Model A, 12 knot	7819,68	2.854.183	2.711,97	5,94%
Model A, 18,77 knot	7095,84	2.589.482	2.460,01	14,66%
Model A, 27 knot	5794,80	2.115.102	2.009,35	30,30%
Model B, 12 knot	7775,28	2.837.977	2.696,08	6,47%
Model B, 18,77 knot	6984,78	2.549.445	2.421,97	15,99%
Model B, 27 knot	5553,12	2.027.389	1.926,02	33,21%

Berdasarkan data pada tabel 4.11, dapat diketahui bahwa pemasangan *rigid sail* memberikan dampak yang signifikan terhadap efisiensi konsumsi bahan bakar kapal dibandingkan dengan kondisi operasi tanpa sistem propulsi bantu. Keberadaan *rigid sail* memungkinkan kapal memperoleh tambahan gaya dorong dari energi angin, sehingga beban kerja mesin utama dapat dikurangi. Dampak langsung dari kondisi tersebut adalah menurunnya kebutuhan bahan bakar selama operasi pelayaran.

Secara umum, seluruh konfigurasi *rigid sail* menunjukkan kemampuan dalam menghasilkan penghematan bahan bakar yang berada pada kisaran 5,94% hingga 33,21%. Persentase tersebut menunjukkan bahwa teknologi ini mampu memberikan efisiensi yang cukup besar, terutama ketika kondisi angin mendukung performa aerodinamika layar. Pada kondisi angin yang lebih rendah, tingkat penghematan berada pada rentang 5,94%–6,47%, yang menandakan bahwa *rigid sail* tetap memberikan kontribusi meskipun energi angin yang tersedia masih terbatas.

Seiring meningkatnya kecepatan angin, penghematan bahan bakar juga mengalami peningkatan yang lebih signifikan. Pada kondisi angin menengah, efisiensi yang dicapai berada pada kisaran 14,66%–15,99%, yang menunjukkan bahwa kontribusi gaya dorong dari *rigid sail* semakin efektif dalam membantu sistem propulsi utama kapal. Sementara itu, pada kondisi angin tinggi, penghematan bahan bakar mencapai 30,30%–33,21%, yang menegaskan bahwa *rigid sail* bekerja paling optimal ketika intensitas angin berada pada tingkat maksimum dalam skenario pengujian.

Model B secara konsisten menghasilkan tingkat penghematan yang lebih tinggi dibandingkan Model A pada seluruh kondisi pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi geometris Model B memiliki performa aerodinamika yang lebih baik dalam mengonversi energi angin menjadi gaya dorong efektif. Dengan demikian, desain *airfoil*

yang lebih optimal terbukti berkontribusi langsung terhadap peningkatan efisiensi bahan bakar kapal.

Secara keseluruhan, hasil pada tabel menegaskan bahwa pemasangan *rigid sail* mampu memberikan penghematan bahan bakar pada rentang sekitar 6% hingga lebih dari 33%, bergantung pada model dan kondisi angin. Penurunan konsumsi bahan bakar secara langsung berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca. Semakin besar persentase penghematan, semakin rendah pula emisi karbon dioksida yang dihasilkan selama operasi kapal. Oleh sebab itu, implementasi *rigid sail* menjadi salah satu langkah konkret dalam mendukung target *dekarbonisasi* sektor pelayaran yang terus didorong oleh *International Maritime Organization*. Dalam konteks tersebut, hasil penelitian ini memperkuat argumentasi bahwa teknologi propulsi bantu berbasis angin memiliki relevansi tinggi sebagai solusi masa depan transportasi laut yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Halaman ini sengaja dikosongkan