

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Sistem Propulsi

Menurut John Carlton dalam bukunya “*Marine Propellers and Propulsion*” sistem propulsi kapal adalah bidang yang kompleks dan multidisiplin, mencakup aspek desain, konstruksi, operasi, dan penelitian. Sistem propulsi kapal, atau lebih dikenal sebagai sistem penggerak kapal, terdiri dari tiga komponen utama: motor induk atau sistem penggerak utama, penggerak atau propulsor, dan komponen transmisi [8].

Motor induk atau sistem penggerak utama adalah komponen yang menyediakan tenaga untuk menggerakkan kapal. Motor induk ini bisa berupa mesin diesel, turbin gas, mesin listrik, atau mesin nuklir, tergantung pada jenis kapal dan kebutuhan operasionalnya. Motor ini mengubah energi bahan bakar atau energi listrik menjadi energi mekanis. Penggerak atau propulsor adalah komponen yang berinteraksi langsung dengan air untuk menghasilkan gaya dorong yang menggerakkan kapal. *Propeller* adalah jenis penggerak yang paling umum digunakan pada kapal. Penggerak lainnya termasuk *Water jets*, *pod drives*, dan *Thrusters*. Fungsi utama propulsor adalah mengkonversi energi mekanis dari motor induk menjadi gaya dorong dengan efisiensi tinggi. Komponen transmisi menghubungkan motor induk dengan propulsor. Sistem ini termasuk poros penggerak, kotak roda gigi (*gearbox*), kopling, dan bantalan. Komponen transmisi memastikan bahwa energi dari motor induk ditransmisikan dengan efisien ke propulsor. Sistem transmisi juga bisa mencakup perangkat untuk mengubah kecepatan dan arah putaran, seperti *gearbox*, yang menyesuaikan kecepatan putaran *propeller* sesuai dengan kebutuhan operasional kapal. Secara keseluruhan, sistem propulsi kapal yang mencakup motor induk, *propulsor*, dan komponen transmisi bekerja bersama untuk menggerakkan kapal dengan efisien.

2.1.1 *Propeller*

Propeller atau *propulsor* adalah alat yang digunakan untuk menggerakkan kapal dari satu tempat ke tempat lain. Cara kerja *propeller* adalah dengan mengubah gerakan putar (rotasi) menjadi daya dorong pada suatu fluida, seperti air atau udara. Daun-daun *propeller* memiliki bentuk seperti sayap (*foil*) yang mirip dengan sayap pesawat terbang. Saat *propeller* berputar, bentuk *foil* pada daunnya menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan antara permukaan depan dan belakang daun. Prinsip Bernoulli dan hukum gerak Newton menjelaskan fenomena ini: ketika kecepatan aliran fluida di atas permukaan *foil* lebih besar daripada di bawahnya, tekanan di atas menjadi lebih rendah daripada di bawah. Perbedaan tekanan ini menghasilkan gaya angkat (*lift*), yang pada konteks *propeller* diterjemahkan menjadi gaya dorong (*Thrust*).

2.1.2 *Propeller Geometry*

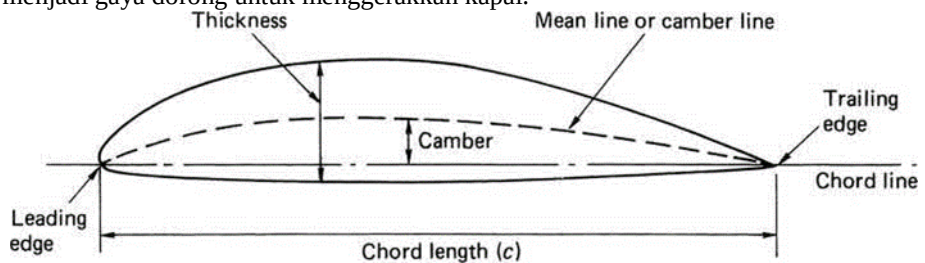
Desain *propeller* sangat penting untuk mempertimbangkan aspek hidrodinamis yang melibatkan penggunaan hidrofoil. Hidrofoil adalah struktur yang menghasilkan gaya lift dan drag saat bergerak melalui fluida. Agar *propeller* berfungsi secara efektif, gaya lift yang dihasilkan harus lebih besar daripada gaya drag. Hidrofoil bekerja di dalam fluida dengan kecepatan tertentu untuk menghasilkan efek hidrodinamis.

Hidrodinamika merujuk pada fenomena di mana terdapat perbedaan kecepatan aliran fluida di bagian atas dan bagian bawah hidrofoil. Fluida yang mengalir di

bagian atas hidrofoil bergerak lebih cepat dibandingkan dengan fluida yang mengalir di bagian bawahnya. Perbedaan kecepatan ini menyebabkan adanya perbedaan tekanan antara bagian atas dan bawah hidrofoil. Tekanan yang lebih rendah di bagian atas dan lebih tinggi di bagian bawah menciptakan gaya lift atau gaya angkat. Gaya lift inilah yang memberikan kemampuan kepada propeller untuk menggerakkan kapal secara efisien melalui air.

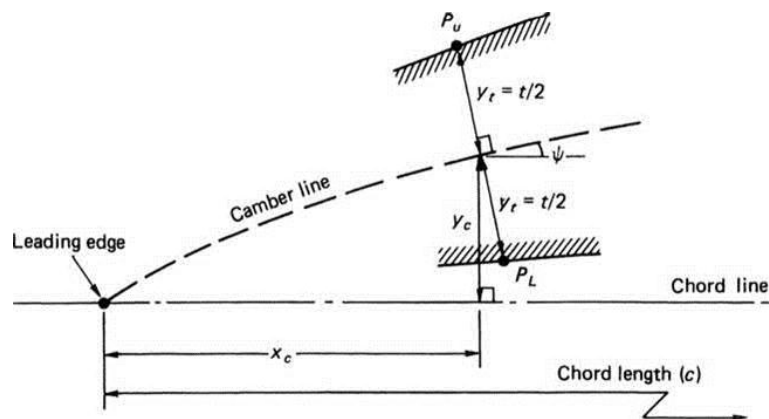
A. Aerofoil

Menurut buku J.S. Carlton “*Marine Propellers and Propulsion*”, *aerofoil* adalah bagian penting dalam desain propulsi laut. Bilah *propeller* yang berbentuk *aerofoil* memiliki tepi depan (*leading edge*) yang bulat dan tepi belakang (*trailing edge*) yang tajam. Bentuk ini memungkinkan fluida mengalir dengan lancar di sepanjang permukaan bilah, menciptakan perbedaan tekanan antara sisi atas dan bawah bilah. Perbedaan tekanan ini menghasilkan gaya angkat yang diterjemahkan menjadi gaya dorong untuk menggerakkan kapal.



Gambar 2.1 General Definition Of An Aerofoil Section

Sumber: J.S. Carlton “*Marine Propellers and Propulsion Chapter 3: Propeller Geometry*”



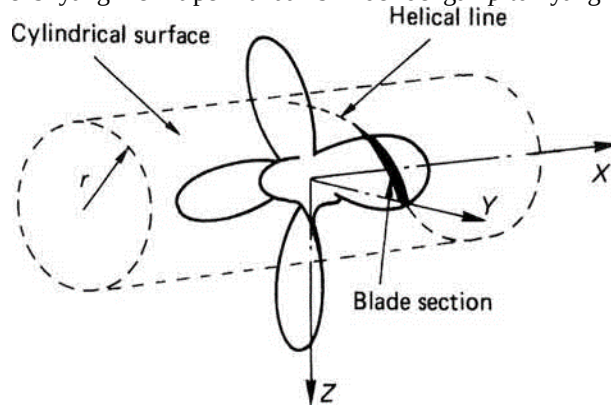
Gambar 2.2 Aerofoil Section Definition

Sumber: J.S. Carlton “*Marine Propellers and Propulsion Chapter 3: Propeller Geometry*”

B. Pitch

Buku “*Marine Propellers and Propulsion*” karya J. S. Carlton, *pitch* menjelaskan jarak sepanjang sumbu silinder yang dilalui oleh heliks dalam satu putaran penuh. Dalam konteks *propeller* kapal, heliks ini menggambarkan bagaimana

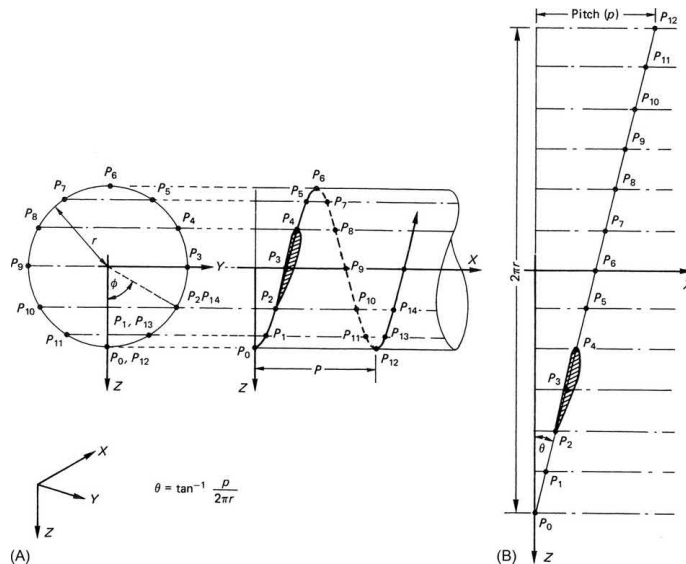
bilah *propeller* melintasi air. Sedangkan heliks pada silinder dengan jari-jari r adalah kurva tiga dimensi yang melilit permukaan silinder dengan *pitch* yang konstan.



Gambar 2.3 Cylindrical Blade Section Definition

Sumber: J.S. Carlton "Marine Propellers and Propulsion Chapter 3: Propeller Geometry"

Pemahaman tentang heliks dan pengembangannya sangat penting. *Propeller* biasanya dirancang dengan bilah yang berbentuk heliks untuk mengoptimalkan aliran air dan meningkatkan efisiensi. *Rake* dan *skew* dari bilah *propeller* juga dapat dipahami lebih baik melalui konsep heliks ini, karena bilah *propeller* mengikuti jalur heliks saat mereka berputar.



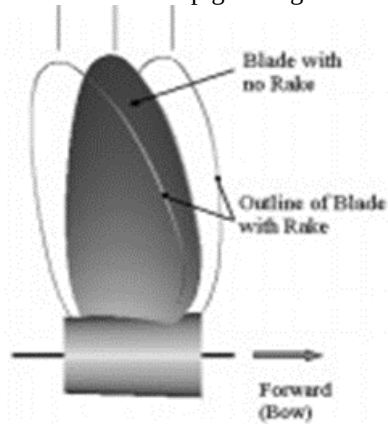
Gambar 2.4 Definition of Pitch: (A) Helix Definition on A Cylinder of Radius R And (B) Development Of Helix On The Cylinder

Sumber: J.S. Carlton "Marine Propellers and Propulsion Chapter: Propeller Geometry"

C. Rake

Rake adalah kemiringan daun *propeller* yang mengacu pada sudut atau arah di mana daun *propeller* miring relatif terhadap *hub* atau poros *propeller*. *Rake* positif menunjukkan bahwa daun *propeller* miring ke belakang, menuju ujung belakang *hub*. Dengan kata lain, ujung daun *propeller* yang terletak jauh dari *hub* condong ke arah buritan kapal. Sebaliknya, *rake* negatif menunjukkan bahwa daun *propeller* miring ke depan, menuju ujung depan *hub*, dengan ujung daun *propeller* yang jauh dari *hub* condong ke arah haluan kapal.

Rake dapat diukur dalam dua cara: dalam inci atau dalam derajat. Ketika diukur dalam inci, *rake* merujuk pada jarak vertikal antara ujung daun *propeller* dan titik acuan pada *hub*. Ketika diukur dalam derajat, *rake* merujuk pada sudut kemiringan daun *propeller* relatif terhadap garis tegak lurus yang ditarik dari *hub*.



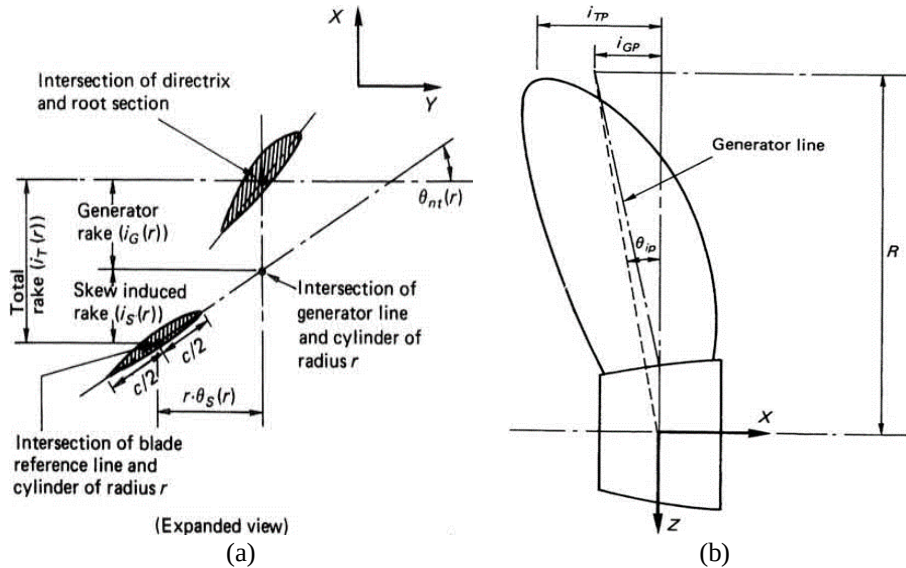
Gambar 2.5 Rake propeller

Sumber: *Propeller Geometry Terms and Definitions*

Buku J S Carlton “*Marine Propellers and Propulsion*”, Menjelaskan *total rake* pada desain *propeller* dibagi menjadi dua komponen utama: *generator line rake* dan *skew-induced rake*. *Rake total* (iT) dari suatu penampang bilah *propeller* relatif terhadap *directrix* adalah jumlah dari kedua komponen ini.

1. *Generator Line Rake* (iG): Ini adalah *rake* yang melekat pada desain bilah *propeller* itu sendiri. *Generator line rake* mengacu pada kemiringan bilah *propeller* yang dirancang secara bawaan untuk memiringkan bilah ke depan atau ke belakang dari *hub*.
2. *Skew-Induced Rake* (is): *Rake* ini dihasilkan dari sudut *skew* bilah *propeller*. *Skew-induced rake* muncul karena bentuk heliks dari penampang bilah *propeller*, yang menyebabkan kemiringan tambahan akibat sudut *skew*.

Kombinasi dari *generator line rake* dan *skew-induced rake* menghasilkan *rake total* dari *propeller*, yang mempengaruhi kinerja hidrodinamika dan karakteristik struktural *propeller*.

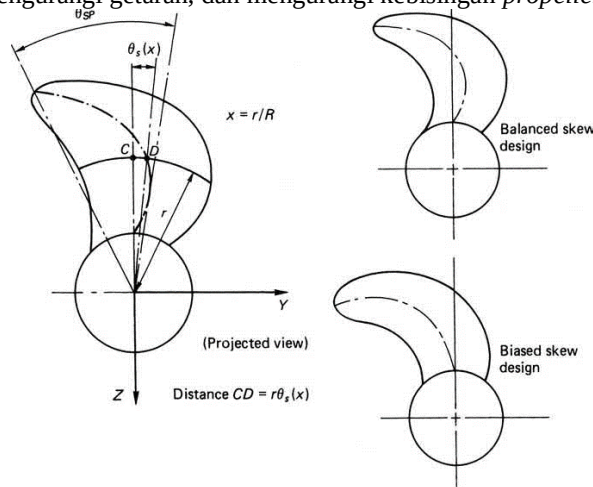


Gambar 2.6 (a) Tip rake definition (b) Definition of Total Rake

Sumber: J.S. Carlton "Marine Propellers and Propulsion Chapter 3: Propeller Geometry"

D. Skew

Skew adalah karakteristik di mana garis tengah bilah propeller melengkung ke belakang dari arah putaran *propeller*. Hal ini dilakukan untuk mengurangi risiko kavitasi, mengurangi getaran, dan mengurangi kebisingan *propeller* saat berputar.



Gambar 2.7 Skew Definition

Sumber: J.S. Carlton "Marine Propellers and Propulsion Chapter 3: Propeller Geometry"

2.1.3 Wageningen B-Series Propellers

Seri *propeller* sistematis (*Systematic propeller series*), seperti *Wageningen B-Series* [2], adalah serangkaian desain propeller yang dikembangkan berdasarkan data hasil uji model propeller dalam kondisi air terbuka (*open Water*). Seri-seri ini digunakan dalam tahap awal perancangan untuk menentukan parameter geometris

yang optimal untuk propeller. Seri sistematis yang digunakan dalam proyek ini adalah *Wageningen B-Series*. Seri B pertama kali dikembangkan oleh Troost, dan peningkatan kemudian dipublikasikan oleh Lammeren. Selanjutnya, Oosterveld dan Oossanen [9] menyesuaikan data K_T - K_Q dan menyajikannya sebagai polinomial regresi, yang ditunjukkan dalam Persamaan (1) dan (2). Pendekatan alternatif untuk menghitung koefisien K_T dan K_Q berdasarkan jaringan saraf untuk menghitung koefisien kinerja propeller juga disajikan.

$$K_T = \sum_{n=1}^{39} C_n(J)^{S_n}(P/D)^{t_n}(A_E/A_0)^{u_n}(Z)^{v_n} \quad (1)$$

$$K_Q = \sum_{n=1}^{47} C_n(J)^{S_n}(P/D)^{t_n}(A_E/A_0)^{u_n}(Z)^{v_n} \quad (2)$$

Karakteristik pengujian air terbuka yang sering kali dipresentasikan dalam bentuk tak berdimensi ini dimaksudkan untuk memungkinkan perbandingan yang lebih mudah antara berbagai propeler yang berbeda. K_T , K_Q , dan η_o adalah koefisien yang menggambarkan kinerja propeler dalam hal daya tarik (K_T), momen tarik (K_Q), dan efisiensi hidrolis (η_o). Penampilan ini disajikan dalam skala *J-basis* [10], yang mengacu pada bilangan J atau kecepatan putaran yang dinormalisasi oleh kecepatan aliran masuk. Dengan demikian, persamaan-persamaan tersebut memberikan gambaran tentang bagaimana kinerja propeler berubah seiring dengan variasi bilangan J . Persamaan masing-masingnya adalah sebagai berikut:

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad (3)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (4)$$

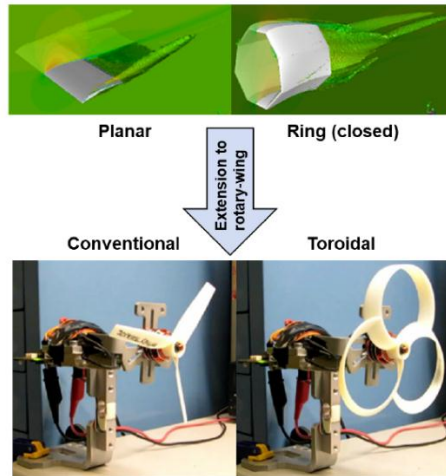
$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (5)$$

$$\eta_o = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q} \quad (6)$$

2.1.4 Toroidal Propeller

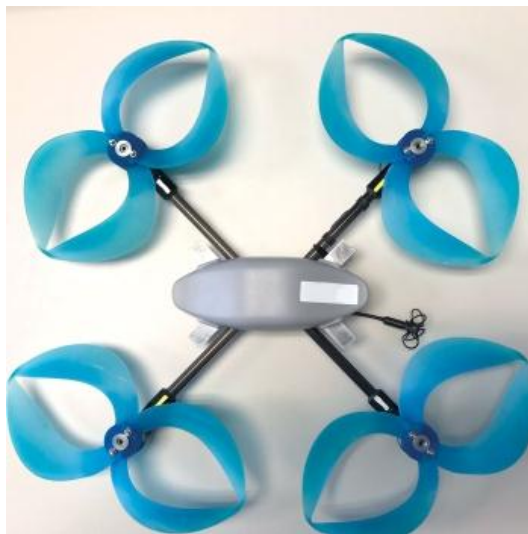
A. Toroidal Propeller MIT

Tahun 2017 Massachusetts Institute of Technology (MIT) melakukan penelitian dan mengklaim bahwa *Toroidal Propeller* adalah inovasi baru dalam sistem propulsi yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi dan daya dorong kapal serta perahu lainnya. Desain ini menggunakan bentuk toroidal, mirip dengan cincin. Bentuk ini dirancang untuk membentuk pusaran air yang ditarik ke arah pusat *hub*, lalu dikeluarkan dalam gerakan melingkar. Hal ini menghasilkan dorongan yang kuat dan lebih efisien dibandingkan dengan *propeller* konvensional.



Gambar 2.8 Perspective View antara Planar dan Ring Wing
 Sumber: *Massachusetts Institute of Technology (MIT) Lincoln Laboratory*

Keunikan terletak pada ujung-ujung elemen tersebut yang melengkung sehingga dapat saling bersentuhan membentuk struktur tertutup. Desain ini menutupi ruang terbuka yang biasanya terdapat pada propeler konvensional, meningkatkan kekakuan seluruh propeler dan memberikan kekuatan yang ditingkatkan. Selain itu, konfigurasi propeler ini juga mengurangi kebisingan yang biasanya dihasilkan oleh perangkat mekanis ini, menghasilkan tanda akustik (*acoustic signature*) yang lebih rendah.

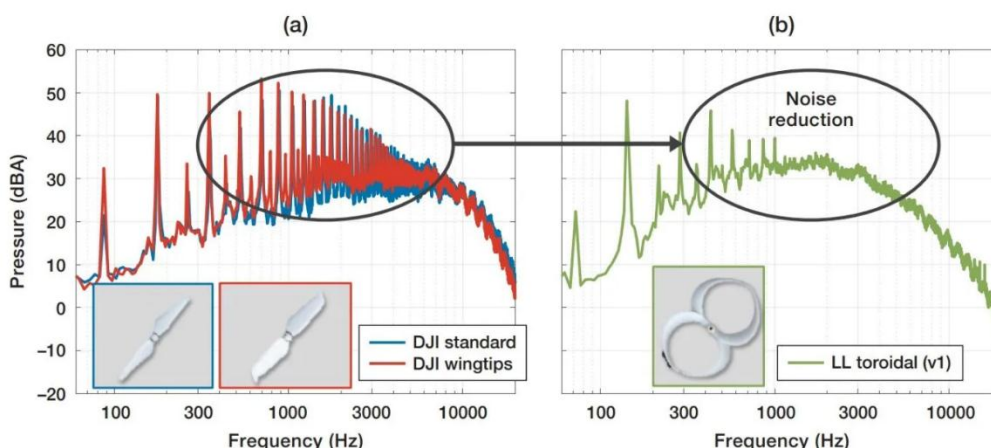


Gambar 2.9 *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* Mengaplikasikan *Toroidal Propeller* pada Drone

Sumber: *Massachusetts Institute of Technology (MIT) Lincoln Laboratory*

Permodelan RC di dunia, desain *Toroidal Propeller* dianggap sebagai inovasi yang semakin penting. Desain ini akan digunakan pada sistem propulsi Model RC,

memungkinkan terbangnya menjadi lebih tenang dan lebih stabil. Selain itu, desain ini juga memberikan keamanan yang lebih baik karena bilahnya yang lebih lembut akan mengalami kerusakan yang lebih sedikit dalam kecelakaan dibandingkan dengan *propeller* tradisional.



The comparison between conventional propellers used on DJI's quadrotors (a) and the toroidal propeller (b) shows the significant reduction of discernible noise achieved by the toroidal propeller.

Gambar 2.10 Perbandingan antara Propeller Konvensional yang Digunakan pada Quadrotor DJI (A) dan Propeller Toroidal (B) Menunjukkan Pengurangan Kebisingan yang Signifikan yang Dicapai Oleh Propeller Toroidal

Sumber: *Massachusetts Institute of Technology (MIT) Lincoln Laboratory*

Desain propeller Toroidal bekerja dengan menciptakan bantalan udara di sekitar bilah propeller. Bantalan ini dapat mengurangi drag dan turbulensi, memungkinkan Model RC bergerak lebih stabil melalui udara. Bantalan udara juga membantu mengurangi getaran, yang penting untuk menjaga stabilitas selama penerbangan. Hal ini sangat penting untuk Model RC yang membawa muatan, karena getaran apa pun dapat menyebabkan muatan menjadi tidak stabil. Desain propeller Toroidal juga membantu mengurangi kebisingan.

B. Toroidal Propeller Sharrow Marine

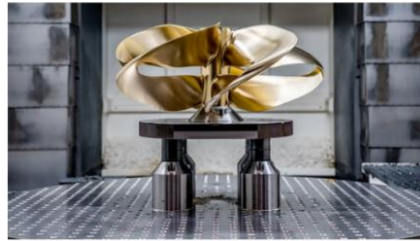
Penelitian kolaboratif antara Laboratorium Lincoln MIT dan Sharrow Marine menghasilkan desain beberapa produk marine *Toroidal Propeller*, termasuk model Sharrow MX™, Sharrow CX-1™, dan Sharrow NX™



(a) Sharrow MX™



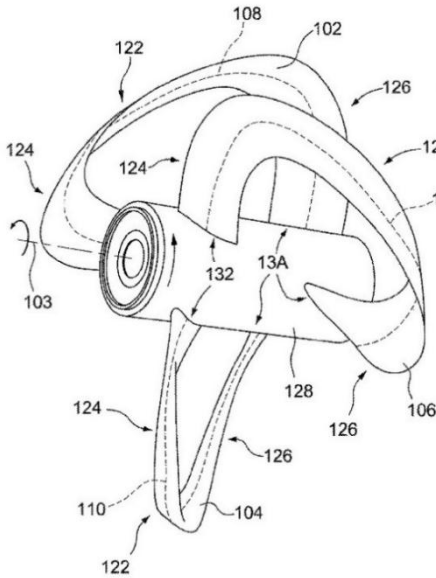
(b) Sharrow CX-1™



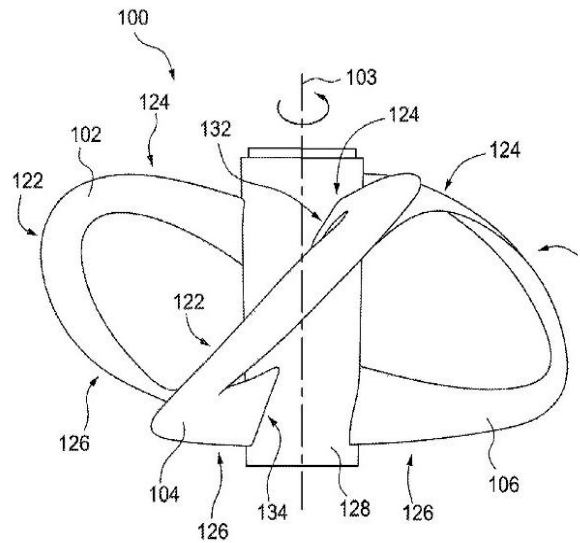
(c) Sharrow
NX™

Gambar 2.11 Sharrow Propeller
Sumber: Sharrow Marine

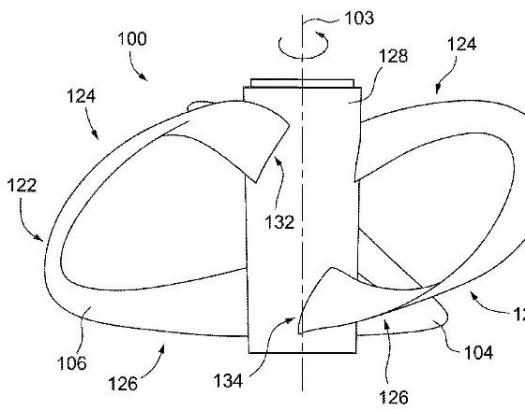
C. Design Sharrow Propeller



Gambar 2.12 Perspective Sharrow
Propeller
Sumber: Sharrow Marine

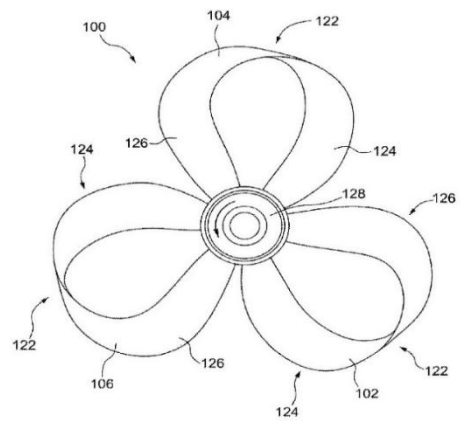


Gambar 2.13 Back Sharrow Propeller
Sumber: Sharrow Marine



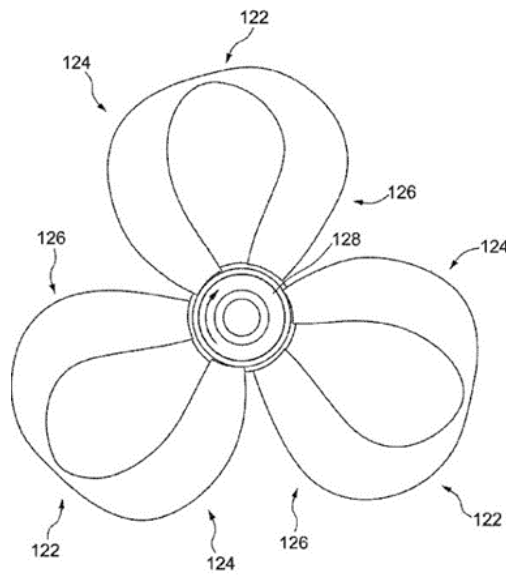
Gambar 2.14 Front Sharrow Propeller

Sumber: Sharrow Marine



Gambar 2.15 Top Sharrow Propeller

Sumber: Sharrow Marine



Gambar 2.16 Bottom Sharrow Propeller

Sumber: Sharrow Marine

D. Testing Sharrow Propeller

Menggunakan pemodelan komputer modern dan manufaktur tambahan (3D), Sharrow Marine telah berhasil memecahkan beberapa masalah dasar dari rotary propulsion termasuk pengurangan kavitasi ujung dan pusaran.



Gambar 2.17 Sharrow Marine Menjalankan Ratusan Desain Prototipe Pada Sebuah Dinamometer Buatan Khusus

Sumber: University of Michigan's Marine HydroDynamics Laboratory

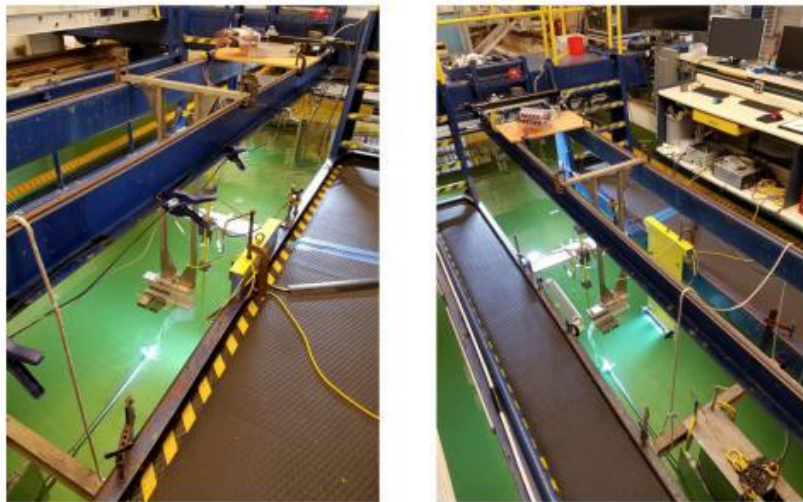
Tahun 2012, selama tahap awal pengembangan, *Sharrow Marine* menjalankan ratusan desain prototipe pada sebuah dinamometer buatan khusus (ditunjukkan di atas), yang mengukur torsi dan dorongan (*Thrust*) dalam rentang kecepatan operasional di dalam sebuah tangki uji kecil. Pengujian awal ini menunjukkan peningkatan efisiensi yang substansial untuk apa yang akan menjadi *Sharrow Propeller*TM—bila dibandingkan dengan propeller konvensional yang terbuat dari bahan yang sama.

Tahun 2013, *Sharrow Marine* melakukan program penelitian dan pengujian dengan *University of Michigan's Marine HydroDynamics Laboratory* untuk memberikan wawasan dan validasi independen dari temuan penelitian Sharrow Marine melalui pengujian pihak ketiga. Di sini, model-model skala dari propeller diuji untuk berbagai aplikasi dengan standar yang ketat.



Gambar 2.18 *Sharrow Propeller™* Dimuat ke Dalam Dinamometer Laboratorium Hidrodinamika Universitas Michigan untuk Pengujian.

Sumber: University of Michigan's Marine HydroDynamics Laboratory



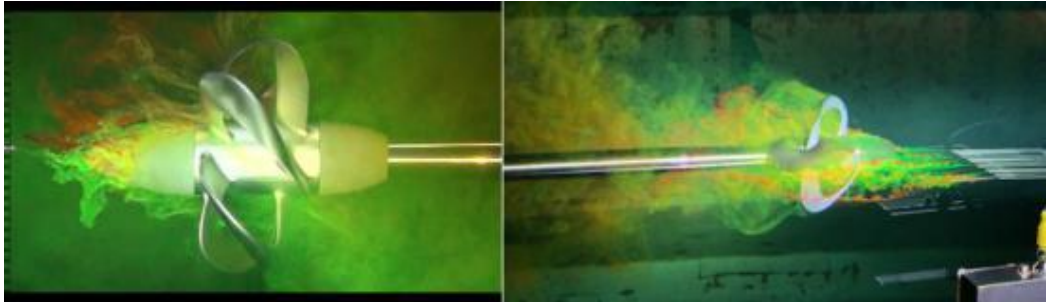
Gambar 2.19 Pemandangan dari Kolam Model Fisik Selama Sesi Pengujian dengan *Sharrow Propeller™*.

Sumber: University of Michigan's Marine HydroDynamics Laboratory



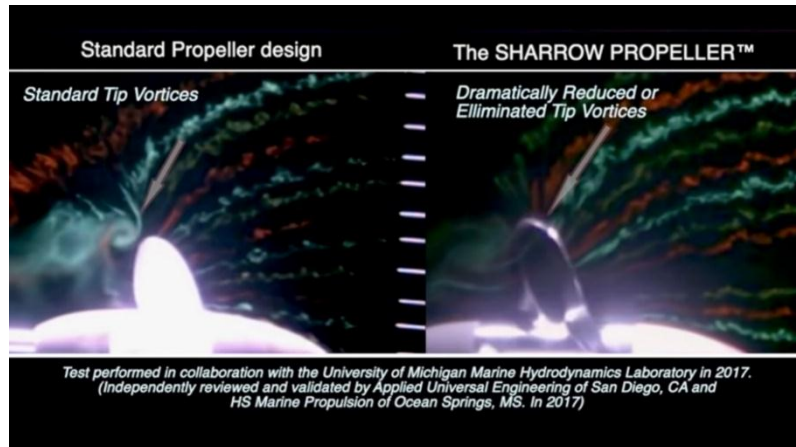
Gambar 2.20 Versi *Sharrow Propeller™* Berbilah 2 Dimuat ke Dalam Dinamometer di University Of Michigan's Marine HydroDynamics Laboratory
 Sumber: University of Michigan's Marine HydroDynamics Laboratory

Hubungan ini dengan fasilitas pengujian pihak ketiga memberikan Sharrow Marine sumber daya vital untuk memvalidasi model numerik dan simulasi CFD dengan pengujian fisik prototipe propeller yang sebenarnya. Melalui upaya penelitian dan pengembangan ini, Sharrow Marine mengembangkan metode properti untuk menciptakan geometri baru untuk berbagai aplikasi mulai dari *tugboat*, kapal supertankers, kapal rekreasi, pesawat, dan drone. "Proses desain iteratif "Closed Loop" adalah standar untuk proses rekayasa mutakhir," kata Sharrow



Gambar 2.21 Sistem Injeksi Pewarna di University Of Michigan's HydroDynamics Laboratory
 Sumber: University of Michigan's Marine HydroDynamics Laboratory

Guna mendapatkan wawasan tentang aliran fluida kompleks melalui *Sharrow Propeller™*, Sharrow Marine mendanai pengembangan sistem visualisasi injeksi pewarna 12 aliran yang ditingkatkan dengan kamera berkecepatan tinggi 750 fps di University of Michigan's Marine HydroDynamics Laboratory. Berikut adalah pandangan dari atas sistem injeksi pewarna di Laboratorium Hidrodinamika Universitas Michigan.



Gambar 2.22 Uji Coba Dilakukan dengan Kerjasama *University Of Michigan Marine HydroDynamics Laboratory* pada Tahun 2017

Sumber: *University of Michigan's Marine HydroDynamics Laboratory*

Gambar tersebut menjelaskan perbandingan antara aliran yang ditangkap oleh *Sharrow Propeller™* dan propeler standar terlihat jelas. Aliran yang tertangkap oleh *Sharrow Propeller™* memiliki volume yang lebih besar dan pencampuran di hilir yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa *Sharrow Propeller™* dapat memperoleh efisiensi yang lebih tinggi karena lebih banyak massa yang dipercepat dengan menggunakan jumlah daya yang sama. Dalam propeler standar, terlihat terbentuknya pusaran ujung (*tip vortex*) yang terkonsentrasi, sedangkan pada *Sharrow Propeller™* tidak ada pusaran ujung yang terbentuk. Kehadiran pusaran ujung pada propeler standar menjadi sumber kerugian yang diinduksi dan dapat menyebabkan kavitasi.

2.2 Kavitasi

Sejarah kavitasi dalam industri kelautan belum banyak diketahui hingga pertengahan abad ke-19. Pada saat itu, Reynolds (1873) menulis serangkaian makalah yang membahas penyebab mesin balap pada kapal uap berbaling-baling sekrup (*engine racing in screw-propelled steamers*). Dalam makalah tersebut, Reynolds memperkenalkan subjek kavitasi seperti yang kita kenal saat ini dengan membahas dampaknya pada kinerja propeller kapal.

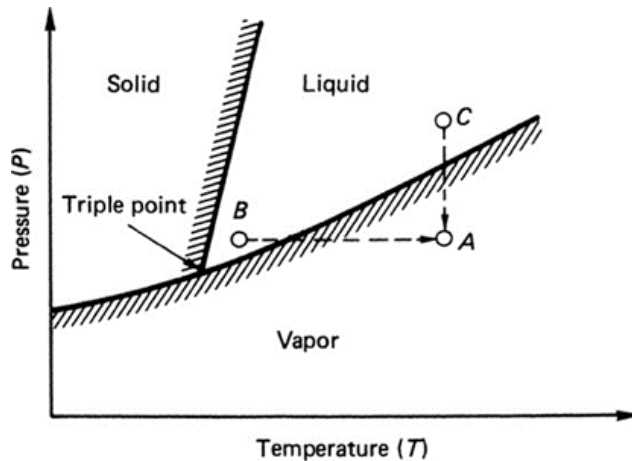
Kavitasi adalah fenomena di mana tekanan dalam cairan turun di bawah tekanan uap, menyebabkan pembentukan gelembung-gelembung uap yang kemudian runtuh atau pecah saat kembali ke tekanan yang lebih tinggi. Ini sering terjadi dalam sistem yang melibatkan perubahan kecepatan dan tekanan yang cepat, seperti pada propeler kapal, pompa, atau turbin, dan bahkan pada organ tubuh manusia seperti jantung dan sendi lutut. Meskipun kavitasi sering dianggap sebagai masalah karena dapat menyebabkan kerusakan pada komponen mesin, namun kadang-kadang juga dimanfaatkan dalam aplikasi tertentu, pemotongan batu atau pelat baja. Dalam banyak kasus, kavitasi harus dihindari atau dikendalikan dengan hati-hati agar tidak merusak peralatan atau menyebabkan gangguan dalam kinerja sistem.

2.2.1 Fisika Dasar Kavitasi

Kavitasi adalah fenomena fisik yang terjadi dalam fluida ketika tekanan lokal turun hingga mencapai atau di bawah tekanan uap fluida pada suhu konstan, menyebabkan terbentuknya gelembung uap. Proses ini bisa dibandingkan dengan mendidihnya air di ketinggian tinggi, di mana tekanan atmosfer yang lebih rendah menyebabkan air mendidih pada suhu lebih rendah. Di ketinggian tinggi seperti puncak gunung, air bisa mendidih pada suhu sekitar 68°C, dibandingkan dengan 100°C di permukaan laut. Dalam konteks propeller kapal, kavitasi terjadi karena penurunan tekanan yang signifikan pada bagian tertentu dari bilah propeller saat berputar. Kecepatan fluida yang meningkat di sekitar bilah menyebabkan penurunan tekanan ini, dan jika tekanan tersebut turun hingga mencapai tekanan uap air pada suhu air laut, terbentuklah gelembung uap. Suhu air laut di sekitar propeller tetap konstan, sehingga kavitasi terutama dipengaruhi oleh penurunan tekanan.

Pemahaman awal tentang kavitasi berasal dari eksperimen di mana tekanan di atas permukaan air dalam terowongan dikurangi menggunakan pompa vakum dilakukan oleh Keller (1974). Ini memungkinkan kavitasi muncul pada kecepatan poros yang lebih rendah, memudahkan pengamatan dan lebih mendekati kondisi nyata yang dihadapi propeller di laut. Kavitasi inisiasi terjadi ketika tekanan lokal di sekitar propeller mencapai tekanan uap fluida. Secara teoritis, nilai kavitasi inisiasi dapat diwakili oleh koefisien tekanan minimum ($C_{p_{min}}$). Namun, beberapa faktor seperti kemampuan fluida menahan tegangan inti, waktu yang diperlukan untuk pertumbuhan gelembung, dan rata-rata waktu dari koefisien tekanan mempengaruhi hubungan sederhana ini. Fluida memiliki tegangan inti yang memerlukan waktu untuk berkembang menjadi gelembung uap yang dapat diamati, sehingga nilai kavitasi inisiasi yang diukur mungkin lebih tinggi daripada ($C_{p_{min}}$). Selain itu, perhitungan dalam simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*) biasanya menghasilkan nilai rata-rata waktu dari koefisien tekanan, yang juga mempengaruhi pengamatan kavitasi.

Pemahaman kavitasi lebih lanjut, kita bisa merujuk pada diagram fasa untuk air yang ditunjukkan pada gambar Gambar 2.23 Phase Diagram untuk Air, diagram fasa ini menunjukkan hubungan antara tekanan, suhu, dan keadaan fasa (cair, padat, gas). Di bawah tekanan rendah, air bisa berubah menjadi uap pada suhu yang lebih rendah, mirip dengan proses kavitasi di mana tekanan lokal rendah menyebabkan pembentukan gelembung uap. Pada tekanan tertentu, air berubah dari fasa cair ke gas (uap) meskipun suhunya tetap konstan, yang merupakan prinsip dasar di balik kavitasi. Gelembung uap yang terbentuk akibat kavitasi kemudian akan kolaps (meledak) ketika memasuki daerah dengan tekanan lebih tinggi, menyebabkan erosi pada bilah propeller dan menghasilkan suara bising. Kolapsnya gelembung dapat menyebabkan kerusakan mekanis pada permukaan *propeller* dan menurunkan efisiensi operasionalnya. Kavitasi dapat menyebabkan penurunan performa *propeller* karena peningkatan drag dan getaran, serta potensi kerusakan fisik pada propeller yang memerlukan perbaikan atau penggantian lebih cepat dari jadwal.



Gambar 2.23 Phase Diagram untuk Air

Sumber: Michel, Jean Pierre Franc and Jean Marie "Fundamentals of Cavitation"[11]

Tabel 2.1 Saturation Temperature of Fresh Water

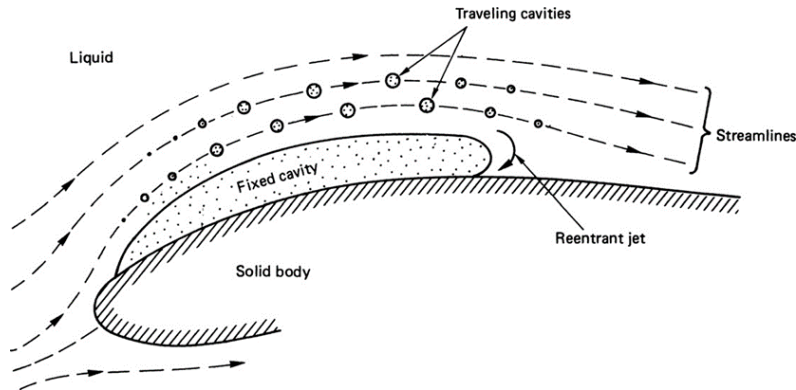
Pressure (kPa)	0.689	6.894	13.79	27.58	55.15	101.3	110.3
Saturation Temperature (°C)	1.6	38.72	52.58	67.22	83.83	100.0	102.4

Sumber: J.S. Carlton "Marine Propellers and Propulsion"

2.2.2 Jenis Kavitasasi yang Dialami Oleh Propeller

Merujuk pada sumber yang digunakan [12], bahwa aliran kavitasasi secara definisi merupakan daerah aliran *multiphase* (*multiphase flow regions*). Air dan uap adalah dua fase yang paling penting dalam aliran *multiphase*; namun, hampir dalam semua kasus, terdapat sejumlah gas, seperti udara, yang memiliki efek signifikan baik dalam kolaps gelembung (*bubble collapse*) maupun inisiasi, terutama yang paling penting dalam mekanisme inisiasi (*inception mechanism*). Oleh karena itu, kavitasasi umumnya dianggap sebagai rezim aliran *multiphase* (*multiphase flow regime*) dengan *three-component flow regime*, berupa fase gas, fase cair, dan fase padat. Knapp (1970) mengklasifikasikan kavitasasi menjadi bentuk tetap, bergerak, atau getaran

Istilah "rongga tetap (*fixed cavity*)" pada konteks kavitasasi mengacu pada aliran terlepas dari batas padat (*solid Boundary*) objek yang terendam membentuk sebuah rongga (*cavity*) atau selubung (*envelope*) yang terbentuk saat aliran terlepas dari permukaan benda terendam dan membentuk rongga yang melekat pada objek tersebut. Rongga tetap umumnya memiliki penampilan yang halus, mengkilap dan stabil relatif terhadap objek di mana mereka terbentuk. Sementara itu, "rongga bergerak (*traveling cavities*)" adalah rongga atau selubung yang bergerak seiring aliran fluida yang mengalir melewati objek. Rongga bergerak dapat terbentuk dari rongga tetap yang terlepas dari permukaan (*surface*) objek atau dari inti yang terbawa oleh aliran fluida. Dalam ilustrasi skematis, perbedaan antara kedua jenis kavitasasi tersebut dapat dijelaskan dengan jelas untuk memahami bagaimana rongga tersebut berinteraksi dengan aliran fluida. Gambar 2.24 menjelaskan secara skematis antara dua jenis dasar kavitasasi ini.



Gambar 2.24 Fixed dan Traveling Cavities

Sumber: Frédéric Caupin dan Eric Herbert "Cavitation in Water: a review"

Kondisi aliran di ujung belakang suatu rongga, seperti yang ditemui dalam aliran kavitasi di sekitar propeller kapal memiliki kesamaan dengan aliran air yang melewati bendungan. Mekanisme pelepasan rongga dimulai oleh *reentrant jet*, yaitu aliran yang terbentuk di antara bagian bawah rongga dan permukaan (*surface*) pada bilah propeller. Perilaku dari jet ini memiliki dampak yang signifikan pada cara kavitasi yang terjadi pada bilah propeller. dari studi yang dilakukan oleh Foeth dan van Terwisga [13] pada profil aerofoil yang berbentuk melengkung (*twisted*). Mereka menemukan bahwa topologi atau bentuk rongga kavitasi secara mendasar mempengaruhi *reentrant jet* masuk ke dalam rongga tersebut. Selain itu, mereka mencatat bahwa bentuk rongga yang cembung (*convex cavity*) cenderung tidak stabil secara alami. Selanjutnya, penelitian tersebut mengamati bahwa kondisi ketika *reentrant jet* mencapai ujung depan aerofoil tidaklah menjadi satu-satunya faktor penentu dalam pelepasan kavitasi. Hal ini disebabkan oleh gerakan jet yang masuk ke samping rongga cembung, yang memiliki gerakan baik dalam arah *chordal* (sepanjang *chord*) maupun *spanwise* (melintang *chord*). Gerakan-gerakan ini terfokus di wilayah penutupan rongga lembaran (*sheet cavity*), di mana mereka mengganggu aliran. Gangguan ini kemudian memicu pelepasan dari struktur utama rongga lembaran (*sheet cavity structure*) tersebut. Dengan demikian, hasil studi tersebut menggambarkan kompleksitas dan pentingnya pemahaman terhadap perilaku aliran kavitasi di sekitar profil aerofoil yang melengkung.

Menariknya, selama runtuhnya struktur rongga lembaran, mereka mencatat dari eksperimen mereka bahwa struktur tersebut berubah menjadi struktur vortikal. Hal ini mengarah pada kesimpulan bahwa ada lapisan pencampuran (*mixing layer*) yang terbentuk dengan vorteks-vorteks khas yang melintang (*spanwise*) dan sepanjang arus *streamwise vortices*. Dengan demikian, hasil penelitian ini menyoroti kompleksitas interaksi antara rongga kavitasi, aliran sekitarnya, dan proses pencampuran yang terjadi selama kavitasi pada profil aerofoil yang melengkung. Jadi pemahaman terhadap perilaku dan karakteristik rongga menjadi sangat penting dalam memahami kavitasi pada propeller kapal.

A. Kavitasi Lembaran (*Sheet Cavitation*)

Sheet Cavitation atau "lembaran kavitasi" adalah suatu fenomena di mana gelembung-gelembung uap terbentuk dalam aliran fluida di sekitar propeler atau objek lainnya karena penurunan tekanan yang signifikan. Fenomena ini terutama

terlihat di bagian belakang atau permukaan hisap (*suction surfaces*) bilah propeler saat bilah tersebut bekerja pada sudut insiden positif (*positive incidence angles*). Ketika aliran fluida melewati bilah propeler dengan sudut insiden yang tidak bebas dari kejutan (*nonshock free angles of incidence*), tekanan hisap yang tinggi terjadi di sekitar tepian depan bilah, menyebabkan uap air dalam cairan mulai menguap dan membentuk gelembung-gelembung kavitasi. Hal ini terjadi ketika bagian-bagian propeler beroperasi pada sudut insiden yang tidak optimal. Gelembung kavitasi ini dapat mengganggu kinerja propeler dan mengurangi efisiensi serta memicu kerusakan pada komponen propeler dan struktur lainnya

Dasarnya, jika sudut insiden meningkat atau nilai kavitasi (*cavitation number*) menurun, kavitasi akan meluas di sepanjang permukaan (*surface*) bilah propeler baik secara *chordal* (mengikuti arah *chord* bilah) maupun radial (menjauhi pusat propeler). Akibatnya, kavitasi akan membentuk lembaran yang meliputi sebagian besar permukaan bilah, dan luasnya bergantung pada desain propeler dan kondisi lingkungan. Gambar 2.25A menunjukkan contoh kavitasi lembaran pada model propeller. meskipun kavitasi pusaran ujung (*tip Vortex Cavitation*) juga terlihat. kavitasi lembaran umumnya stabil, ada kasus di mana beberapa tingkat ketidakstabilan dapat terjadi. Dalam situasi tersebut, penting untuk mengidentifikasi penyebab ketidakstabilan, dan jika dianggap akan berdampak pada skala penuh, langkah-langkah perbaikan harus diambil untuk mencegah erosi bilah atau fluktuasi tekanan yang tidak diinginkan.

B. Kavitasi Gelembung (*Bubble Cavitation*)

Kavitasi gelembung/ *Bubble cavitation* (Gambar 2.25B) dipengaruhi terutama oleh komponen-komponen *Pressure distribution* yang menyebabkan tekanan hisap (*suction Pressures*) tinggi di daerah *midchord* dari bagian-bagian bilah. Dengan demikian, kombinasi *camber line* dan *thickness Pressure distributions* memiliki pengaruh besar terhadap rentan suatu propeler terhadap kavitasi gelembung (*bubble cavitation*). Karena kavitasi gelembung biasanya pertama kali terjadi di daerah *midchord* dari bilah, ia cenderung terjadi dalam aliran yang tidak terpisah (*nonseparated flows*). Tipe kavitasi ini, seperti namanya, muncul sebagai gelembung-gelembung individual yang tumbuh, terkadang cukup besar, dan cepat menyusut di atas permukaan bilah.

C. Kavitasi Awan (*Cloud Cavitation*)

Kavitasi awan (*Cloud Cavitation*) sering terjadi di belakang kavitasi lembaran yang stabil (*stable sheet cavities*) dan dalam aliran yang mengalami pemisahan yang sedang, di mana pusaran kecil (*small vortices*) merupakan asal mula terbentuknya kavitasi kecil (*small cavities*). Jenis kavitasi ini muncul sebagai awan atau "kabut" dari gelembung-gelembung yang sangat kecil (*very small bubbles*), dan kehadirannya selalu harus diperhatikan karena dapat menyebabkan erosi pada propeler, kavitasi tipe ini dapat dilihat pada (Gambar 2.25A dan di Gambar 2.25B)

D. Jenis Kavitasi Vortex pada Propeller

Kavitasi sering kali terjadi di sekitar bilah propeler, terutama di ujung bilah, tepi depan, dan pusat poros. Jenis kavitasi yang disebut sebagai *vortex types of cavitation* (Jenis kavitasi berupa pusaran) terbentuk dari inti pusaran yang melepaskan tekanan rendah di sekitar mereka.

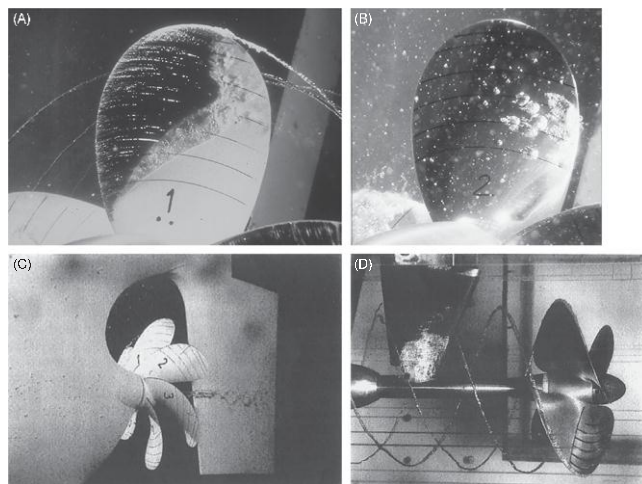
Secara visual, hanya bagian kavitasi dari pusaran (*vortex*) yang terlihat, karena di situlah tekanan rendah yang menyebabkan pembentukan gelembung terjadi. Namun, *vortex* tersebut sebenarnya meluas di luar bagian yang terlihat, memengaruhi cairan di sekitarnya. Oleh karena itu, meskipun kita hanya melihat efek kavitasi pada permukaan yang terkena, *vortex* namun sebenarnya memiliki dampak yang lebih luas dan lebih kompleks.

b) Kavitasi Vortex di Hub (*Hub Vortex Cavitation*)

Pusaran pusat (*hub vortex*) terbentuk dari kombinasi *individual vortices* yang dilepaskan dari setiap akar bilah propeler, dan meskipun pusaran-pusaran ini kemungkinan kecil mengalami kavitasi, di bawah pengaruh kerucut propeller (*propeller cone*) yang konvergen, kombinasi dari pusaran akar bilah (*blade root vortices*) memiliki tingkat kecenderungan kavitasi yang tinggi. Ketika ini terjadi, kavitasi yang dihasilkan biasanya sangat stabil dan terlihat oleh pengamat sebagai tali (*rope*) dengan serat-serat yang sesuai dengan jumlah bilah propeler.

c) Kavitasi Vortex Ujung (*Tip Vortex Cavitation*)

Ketika propeler berputar, ujung-ujung bilahnya menciptakan pusaran udara di sekitarnya. Pusaran (*vortex*) ini kemudian dapat menyebabkan kavitasi pada daerah sekitarnya. Kavitasi pada pusaran ujung (*tip vortex*) biasanya bisa diamati beberapa jarak di belakang ujung bilah. Pada awalnya, pusaran tersebut "belum terikat (*unattached*)," tetapi saat pusaran semakin kuat, baik karena beban bilah yang lebih tinggi atau penurunan angka kavitasi (*cavitation number*), pusaran akan bergerak menuju ujung bilah dan akhirnya menjadi terikat. Gambar 2.25 A, C, dan D menunjukkan contoh *Hub Vortex Cavitation* dan *tip Vortex Cavitation* secara berturut-turut.



Gambar 2.25 Jenis Kavitasi Pada Propeller (MARIN): (A) Sheet Cavitation dan Cloud Cavitation Bersama dengan Tip Vortex; (B) Midchord Bubble Cavitation Bersama dengan Tip Vortex dan Beberapa *Leading edge Streak Cavitation*; (C) *Hub Vortex Cavitation* dengan Traces LE dan Tip.

Sumber: J.S. Carlton "Marine Propellers and Propulsion" [8]

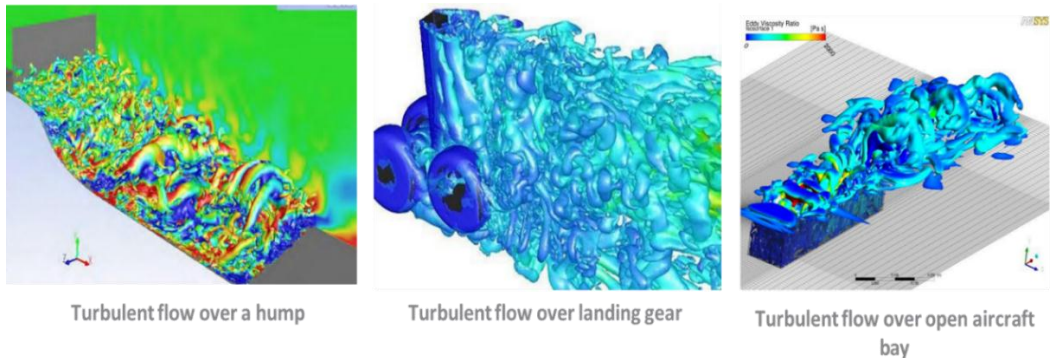
d) Vortex Tepi Depan (*Leading edge Vortex*)

Pusaran tepi depan (*Leading edge Vortex*) tidak selalu berasal dari pusaran tepi lokal (*local tip vortex*). Sering kali, pusaran ini dimulai dari bagian dalam radius bilah propeler karena di sana beban pada bilah biasanya lebih tinggi dan, yang lebih penting, kelengkungan geometris pada tepi depan bilah (*blade leading edge*) lebih besar, terutama pada propeler yang sangat miring (*highly skewed propellers*). Bergantung pada bentuk geometris tepi depan. Jenis pusaran ini bergantung pada vortisitas yang terbentuk di tepi depan bilah dan diangkut keluar menuju ujung bilah (*blade tip*). Hal ini tergantung pada gradien tekanan yang merugikan di sekitar *leading edge* dan komponen kecepatan sepanjang *leading edge*, yang merupakan fungsi dari bentuk miring bilah. Setelah meninggalkan bilah, pusaran tepi depan dan ujung (*blades the leading edge and tip vortices*) akan bergabung dengan pusaran belakang (*trailing vortex*) menjadi satu. Namun, jika ujung telah dikurangi bebannya dalam proses desain, pusaran tepi depan dan ujung (*leading edge and tip vortex*) bisa memiliki arah gerak yang berlawanan, yang menyebabkan bentuk kavitasi yang rumit dan tersebar, kadang melibatkan struktur cincin kavitasi. Hal ini dapat menghasilkan pola kavitasi yang kompleks dan sulit diprediksi, terutama jika terjadi interaksi antara pusaran-pusaran ini dengan aliran fluida sekitarnya.

2.3 Turbulance

Reynolds number memberikan gambaran tentang seberapa kuat efek inersia relatif (yang terkait dengan efek konvektif) terhadap efek *viscous* dalam suatu aliran fluida. Pada *Reynolds number* di bawah nilai kritis tertentu, yang disebut *critical Reynolds number Recrit*, aliran cenderung bersifat halus dan beraturan, di mana lapisan-lapisan fluida tetangga mengalir secara teratur tanpa gangguan. Kondisi ini disebut sebagai aliran laminar. Pada nilai *Reynolds number* di atas Re kritis/critical, terjadi serangkaian peristiwa kompleks yang pada akhirnya mengakibatkan perubahan drastis dalam karakter aliran. Pada tahap akhir, perilaku aliran menjadi acak dan kacau (*chaotic*). Gerakan menjadi intrinsik tidak stabil (*unsteady*) bahkan dengan kondisi batas (*Boundary Conditions*) yang diberlakukan tetap. Kecepatan dan semua properti aliran lainnya bervariasi secara acak dan kacau. Regimen ini dikenal sebagai aliran turbulen

Turbulensi adalah kondisi gerakan fluida tiga dimensi, tidak tetap (*unsteady*), tidak teratur (aperiodik) di mana jumlah yang dibawa (massa, momentum, spesies skalar) berfluktuasi dalam waktu dan ruang. fluktuasi dalam aliran turbulen menyebabkan pencampuran yang lebih efektif dari berbagai kuantitas seperti massa, momentum, dan panas. Meskipun aliran itu sendiri acak dan sulit diprediksi secara langsung, namun jika kita melihat rata-rata statistik dari aliran tersebut dari waktu ke waktu, kita dapat menemukan pola yang dapat memberikan pemahaman yang lebih baik tentang perilaku aliran turbulen secara keseluruhan. Seperti yang diketahui, fluktuasi yang mendefinisikan turbulensi adalah hasil dari struktur aliran pusaran ("eddy") dengan berbagai ukuran, mulai dari yang sangat kecil (yang lebih homogen dan independen dari geometri) hingga pusaran besar yang diatur oleh geometri aliran

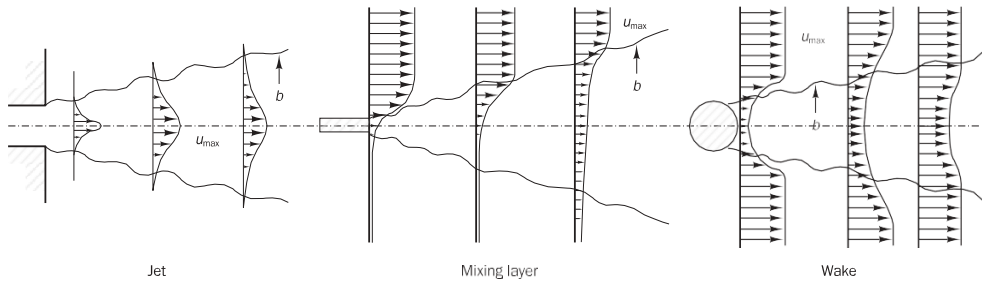


Gambar 2.26 Turbulence Dalam Kehidupan Nyata
 Sumber: ANSYS, *Introduction Basics of Turbulent Flows*

Aliran turbulen bebas (*Free turbulent flows*) mengacu pada fenomena aliran di mana tidak ada interaksi yang signifikan dengan permukaan atau geometri yang menentukan arah aliran. Tiga jenis aliran turbulen bebas yang umum adalah lapisan pencampuran, jet, dan sisa.

1. Lapisan Pencampuran (*Mixing Layer*): Lapisan pencampuran terbentuk di antara dua aliran fluida yang memiliki kecepatan relatif yang berbeda. Salah satu aliran memiliki kecepatan yang lebih tinggi daripada yang lain, dan ketika kedua aliran bertemu, terjadi pencampuran yang menyebabkan pertukaran massa dan momentum antara keduanya. Lapisan pencampuran memiliki karakteristik distribusi kecepatan yang berubah secara signifikan dalam arah aliran.
2. Jet: Jet adalah aliran fluida dengan kecepatan tinggi yang disempatkan atau dikeluarkan dari suatu lubang atau saluran. Di dalam jet, daerah dengan kecepatan tinggi dikelilingi oleh fluida yang relatif diam di sekitarnya. Distribusi kecepatan dalam arah aliran jet biasanya menunjukkan pola yang khas, dengan kecepatan yang menurun secara gradual seiring dengan jarak dari sumber jet.
3. Sisa (*Wake*): Sisa terbentuk di belakang suatu objek dalam aliran, seperti pesawat terbang atau benda tumpul lainnya. Ketika aliran bertabrakan dengan objek tersebut, terjadi pemisahan aliran di belakangnya, membentuk daerah bergerak lambat yang dikelilingi oleh fluida yang bergerak lebih cepat di sekitarnya. Distribusi kecepatan dalam arah aliran sisa biasanya menunjukkan adanya daerah stagnasi di belakang objek, diikuti oleh peningkatan kecepatan yang gradual seiring dengan jarak dari objek.

Menggunakan gambaran distribusi kecepatan rata-rata dalam arah aliran, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.27, kita dapat memvisualisasikan bagaimana kecepatan berubah seiring dengan jarak dari sumber aliran atau objek dalam aliran tersebut.

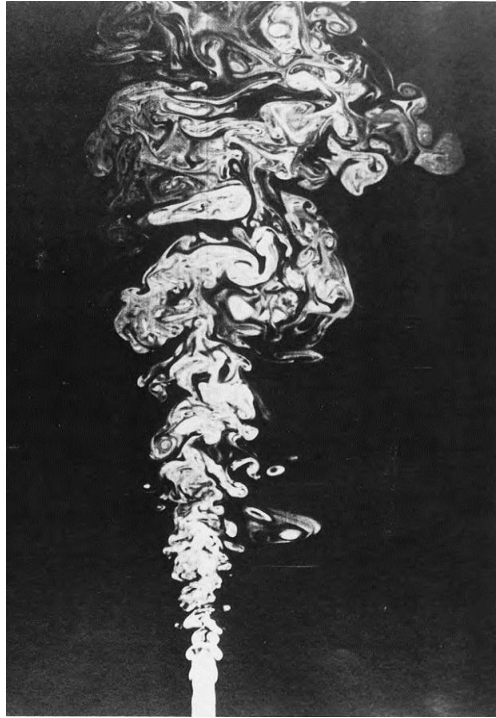


Gambar 2.27 Free turbulent flow

Sumber: H K Versteeg and W Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*

Gambar tersebut menjelaskan pentingnya perubahan kecepatan dalam lapisan tipis awal dari ketiga jenis aliran tersebut. Ketika aliran-aliran yang berbeda bertemu, perubahan mendadak dalam kecepatan terjadi, yang memicu transisi ke keadaan turbulen. Proses ini terjadi dalam jarak yang sangat singkat dari titik pertemuan aliran. Setelah transisi ke turbulensi terjadi, terjadi pencampuran yang kuat (*vigorous mixing*) antara lapisan-lapisan fluida yang berdekatan (*adjacent fluid layers*), dan wilayah di mana perubahan kecepatan berlangsung memperluas secara cepat.

Gambar 2.28 menyoroti sifat turbulen aliran jet. Dapat dilihat bahwa aliran turbulen ini memiliki berbagai skala panjang, dari *Large eddies* yang ukurannya sebanding dengan lebar aliran, hingga eddies yang sangat kecil. Ini menunjukkan kompleksitas dan variasi yang signifikan dalam kecepatan aliran, dengan struktur turbulen yang terbentuk di berbagai ukuran dan skala.



Gambar 2.28 Visualisation of a jet flow
Sumber: Van Dyke (1988), An Album of Fluid Motion

2.4 Mathematical Model

2.4.1 RANS Equations

Simulasi aliran didasarkan pada solusi dari persamaan RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). diperkenalkan dua kerangka acuan: penggunaan dua kerangka acuan dalam simulasi aliran. Kerangka acuan pertama adalah kerangka acuan inersial tetap bumi/ *inertial earth-fixed reference frame* (X, Y, Z), sementara kerangka acuan kedua adalah kerangka acuan propeller non-inersial tetap/ *non-inertial propeller-fixed reference frame* (x, y, z) yang berputar dengan kecepatan sudut konstan Ω . Vektor kecepatan rata-rata didefinisikan dalam kedua kerangka acuan: kecepatan absolut diukur relatif terhadap kerangka acuan bumi/ *earth-fixed reference frame* (U_i), sedangkan kecepatan relatif diukur relatif terhadap kerangka acuan propeller (V_i). Penggunaan kedua kerangka acuan ini penting untuk menganalisis aliran dengan benar, terutama dalam konteks propeller kapal. Selain itu, jika diasumsikan bahwa propeller beroperasi dalam kondisi air terbuka (*open-Water Conditions*), maka aliran dianggap statistik stabil dalam kerangka acuan propeller.

Menggunakan asumsi bahwa fluida tidak dapat dimampatkan, persamaan RANS (kontinuitas dan momentum) yang ditulis dalam kerangka acuan tetap baling-baling/ *propeller-fixed reference frame* x_i dan mempertimbangkan kecepatan rata-rata yang tidak diketahui dalam kerangka acuan tetap bumi/ *earth-fixed reference frame* U_i , memiliki bentuk:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, (11)$$

$$\rho \frac{\partial(V_j U_i)}{\partial x_j} + \rho \varepsilon_{ijk} \Omega_j U_k = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] (12)$$

Simbol ρ adalah densitas fluida, μ adalah viskositas fluida, μ_t adalah viskositas turbulen, dan ε adalah simbol Levi-Civita. Tekanan yang dimodifikasi (*modified Pressure*) dirumuskan $P = p + 2/3 \rho k$, di mana p adalah tekanan statis dengan tekanan hidrostatik sebagai referensi, dan k adalah energi kinetik turbulensi. Dalam persamaan ini, tegangan Reynolds ditentukan dari model turbulensi dan transisi, yang didasarkan pada *Boussinesq eddy-viscosity hypothesis*. Perlu dicatat bahwa dalam formulasi ini, percepatan Coriolis dan sentripetal disederhanakan menjadi satu istilah $\varepsilon_{ijk} \Omega_j U_k$, yang mengurangi jumlah istilah sumber dari persamaan momentum.

2.4.2 Turbulence Model

Model aliran *multiphase* homogen digunakan untuk memodelkan dua fase uap (*two-phase vapor*) dan campuran cair sebagai medium homogen sehingga komponen fluida *multiphase* diasumsikan memiliki kecepatan dan tekanan yang sama. Model tersebut kemudian menggunakan rata-rata tertimbang dari parameter aliran dua fase (*two-phase flow*). ρ_m adalah densitas dan μ_m adalah viskositas dinamis dari campuran yang didefinisikan sebagai:

$$\rho_m = \alpha_v \rho_v + \alpha_l \rho_l (13)$$

$$\mu_m = \alpha_v \mu_v + \alpha_l \mu_l (14)$$

Simbol α merupakan fraksi volume, yang menggambarkan seberapa besar volume dari setiap fase (uap atau cair) yang hadir dalam campuran. ρ adalah densitas, yang merupakan ukuran seberapa padatnya suatu zat, dan μ adalah viskositas dinamis, yang mengukur resistensi zat terhadap perubahan bentuknya ketika bergerak. Subskrip v mewakili fase uap (vapor), l adalah fase cair (liquid), dan m adalah campuran cair-uap (mixture). Persamaan kontinuitas dan momentum untuk aliran campuran kemudian adalah:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial x_i} = 0 (15)$$

$$\frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho_m f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_m + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] (16)$$

Simbol u_i adalah kecepatan dan f_i adalah gaya tubuh (*body force*) dalam arah i , p adalah tekanan campuran, dan μ_t adalah viskositas turbulen. Model turbulensi k- ω SST yang dikembangkan oleh Menter (1994) [14] telah banyak digunakan untuk memprediksi struktur aliran kompleks, terutama aliran terpisah dalam gradien tekanan yang tidak menguntungkan di sekitar mesin berputar [15], [16], [17], [18]. Persamaan-persamaannya adalah:

$$\frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] + P_k - \beta' \rho_m k (17)$$

$$\frac{\partial(\rho_m \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right] + (1 - F_1) 2 \rho_m \frac{1}{\sigma_{\omega 3} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho_m \omega^2 \quad (18)$$

Setiap koefisien dalam rumus tersebut, α_3 , β_3 , σ_{k3} , dan $\sigma_{\omega 3}$, adalah kombinasi linear dari koefisien yang sesuai dalam model k- ω dan k- ϵ . Istilah generasi turbulensi (*turbulence generation*), P_k , diberikan oleh:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \left(3 \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho_m k \right) \quad (19)$$

Turbulent eddy viscosity dibatasi untuk memprediksi perilaku transmisi yang wajar.

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (20)$$

Setiap simbol S adalah ukuran invarian laju regangan (*invariant measure of the strain rate*) dan F_1 dan F_2 adalah fungsi hibrida yang didefinisikan sebagai:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500 v}{\omega y^2} \right), \frac{4 \rho k}{C D_{kw} \sigma_{\omega 2} y^2} \right) \right]^4 \right\} \quad (21)$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2 \sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500 v}{\omega y^2} \right) \right]^2 \right\} \quad (22)$$

Setiap simbol y adalah jarak ke dinding terdekat dan v adalah viskositas kinematik.

2.4.3 Cavitation model (Mass transfer modeling)

Sebuah model kavitasi yang sesuai sangat penting untuk memprediksi aliran kavitasi dengan keandalan di sekitar propeller kapal laut. Model kavitasi ZGB [19] digunakan di sini untuk simulasi numerik karena model ini telah terbukti memiliki kemampuan generalisasi yang baik dan akurasi komputasi dalam berbagai simulasi aliran kavitasi dengan geometri yang relatif kompleks. Persamaan transportasi uap (*vapor transport equation*) digunakan untuk memprediksi pertumbuhan dan pergerakan daerah uap:

Persamaan Rayleigh-Plesset menjelaskan pertumbuhan gelembung uap (*vapour bubble*) dalam cairan/ liquid:

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{R_B} = \frac{P_v - P}{\rho_l} \quad (23)$$

Setiap simbol R_B mewakili radius gelembung (*bubble radius*), σ mewakili koefisien tegangan permukaan (*surface tension coefficient*), dan P_v mewakili tekanan uap. Mengabaikan istilah orde kedua dan tegangan Permukaan (*surface tension*) menghasilkan persamaan yang disederhanakan,

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_l}} \quad (24)$$

Laju perubahan massa dari sebuah gelembung tunggal mengikuti (*rate of change of mass of a single bubble follows*) sebagai

$$\frac{dm_B}{dt} = 4\pi R_B^2 \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_l}} \quad (25)$$

Jika terdapat N_B gelembung per satuan volume, kita dapat menyatakan fraksi volume uap (*vapour volume fraction*) sebagai,

$$r_v = V_B N_B = \frac{4}{3} \pi R_B^3 N_B \quad (26)$$

dan laju transfer massa antarfasa total (*total interphase mass transfer rate*) akibat kavitasi per satuan volume adalah:

$$S_{lv} = \frac{3r_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_l}} \quad (27)$$

Model ini telah diperoleh dengan mengasumsikan pertumbuhan gelembung (penguapan/ *vaporization*). Ini dapat digeneralisasikan untuk memasukkan kondensasi sebagai berikut:

$$S_{lv} = F \frac{3r_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|P_v - P|}{\rho_l}} \text{sig n}(P_v - P) \quad (28)$$

Setiap simbol F adalah koefisien kalibrasi empiris. Model ini berfungsi dengan baik untuk kondensasi. Namun, secara fisik tidak benar (dan numerik tidak stabil) jika diterapkan pada penguapan (*vaporization*). Salah satu asumsi kunci dalam penurunannya adalah bahwa gelembung kavitasi (*cavitation bubbles*) tidak berinteraksi satu sama lain. Ini masuk akal hanya selama tahap awal kavitasi, ketika gelembung kavitasi tumbuh dari situs nukleasi (*nucleation*). Ketika fraksi volume uap meningkat, kepadatan situs nukleasi harus berkurang secara proporsional. Dengan ini, kita mengganti r_v dengan $r_{nuc}(1 - r_v)$ selama penguapan, di mana r_{nuc} adalah fraksi volume situs nukleasi. R_B diinterpretasikan sebagai radius situs nukleasi. Bentuk akhir model kavitasi adalah:

$$S_{lv} = \begin{cases} F_{vap} \frac{3r_{nuc}(1 - r_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_l}} & \text{if } P < P_v \quad (29) \\ F_{cond} \frac{3r_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P - P_v}{\rho_l}} & \text{if } P > P_v \quad (30) \end{cases}$$

Parameter-model berikut telah ditemukan berfungsi baik untuk berbagai fluida dan perangkat: α_{nuc} adalah fraksi volume dari zona di mana nukleasi (*nucleation zone*) terjadi, yaitu di mana gelembung gas pertama kali muncul. F_{vap} dan F_{cond}

adalah koefisien empiris yang digunakan untuk menghitung laju evaporasi (*empirical evaporation*) dan kondensasi (*condensation coefficients*), Nilai-nilai yang umum digunakan untuk parameter-parameter ini adalah $R_B = 1 \text{ } \mu\text{m}$, $\alpha_{nuc} = 5 \times 10^{-4}$, $F_{vap} = 50$, dan $F_{cond} = 0.01$

Aliran kavitasi tak stabil (*unsteady cavitating flows*), telah diamati dalam literatur bahwa model turbulensi standar gagal memprediksi dengan tepat perilaku osilasi aliran. Hal ini juga diamati dengan model kavitasi yang telah kita usulkan. Kami mengikuti contoh [20] dan menggunakan formulasi yang dimodifikasi untuk viskositas turbulen. Dalam model k - ϵ standar, *eddy viscosity* untuk campuran adalah.

$$\mu_{tm} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (31)$$

Ekspresi yang dimodifikasi secara efektif mengurangi *eddy viscosity* di daerah-daerah yang mengalami kavitasi dengan menggunakan

$$\mu_{tm} = f(\rho) C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (32)$$

Dituliskan dalam rumus berikut:

$$f(\rho) = \rho_v + \left(\frac{\rho_v - \rho_m}{\rho_v - \rho_l} \right)^n (\rho_l - \rho_v) \quad (33)$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”