

Studi Numerik Pengaruh Bentuk Daun Kincir Pada *Paddle Wheel Aerator* Terhadap *Dissolved Oxygen* Di Tambak Udang

Satriya Toyib Setyautama^{1*}, Dhea Nova², Eky Novianarenti³, Ni'matut Tamimah⁴ dan
Erlinda Ningsih⁵

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia, 60111

⁵ Jurusan Teknik Kimia, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, 60111

Email: novakammila22@ppns.ac.id

Abstrak

Masalah utama dalam budidaya tambak udang adalah buruknya kualitas air, terutama akibat rendahnya kadar oksigen terlarut (*dissolved oxygen*) yang dapat menyebabkan stres, penyakit, hingga kematian pada udang. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi bentuk dan kedalaman paddle wheel terhadap kecepatan aliran air yang berdampak pada peningkatan kadar oksigen. Metode yang digunakan adalah simulasi numerik menggunakan ANSYS Fluent 2021 R1, dengan variasi bentuk paddle meliputi lengkung radius, lurus radius, dan lipat, serta kedalaman tercelup 8 cm hingga 12 cm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa bentuk paddle lurus radius dengan kedalaman tercelup 12 cm menghasilkan kecepatan aliran rata-rata tertinggi sebesar 1,82006 mm/s, dibandingkan dengan bentuk lainnya. Visualisasi kontur aliran menunjukkan pola serupa pada semua variasi. Kesimpulannya, paddle lurus radius yang tercelup 12 cm dari permukaan air merupakan konfigurasi paling optimal untuk meningkatkan kadar oksigen di tambak udang.

Kata kunci: *dissolved oxygen*; kecepatan aliran, *paddle wheel aerator*; visualisasi aliran

Abstract

The main problem in shrimp farming is poor water quality, especially due to low dissolved oxygen levels, which can cause stress, disease, and even death in shrimp. This study aims to analyze the effect of variations in paddle wheel shape and depth on water flow velocity, which impacts oxygen levels. The method used is numerical simulation using ANSYS Fluent 2021 R1, with paddle shape variations including curved radius, straight radius, and folded, as well as immersion depths ranging from 8 cm to 12 cm. The simulation results showed that the straight radius paddle shape with a submerged depth of 12 cm produced the highest average flow velocity of 1.82006 mm/s compared to other shapes. Flow contour visualization showed similar patterns across all variations. In conclusion, the straight radius paddle submerged 12 cm below the water surface is the most optimal configuration for increasing oxygen levels in shrimp ponds.

Keywords: *dissolved oxygen*, flow velocity, flow visualization, *paddle wheel aerator*

1. Pendahuluan

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki potensi besar dalam sektor perikanan dan akuakultur, khususnya budidaya tambak udang yang menjadi salah satu komoditas ekspor unggulan. Menurut Hakim (2017), Indonesia menduduki peringkat kedua sebagai negara penghasil udang terbesar di dunia dalam rentang tahun 2004–2013 dengan volume mencapai 13.147.297 ton. Keberhasilan budidaya udang di tambak sangat bergantung pada manajemen kualitas air, terutama dalam menjaga kadar oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen/DO*) yang merupakan faktor vital bagi kelangsungan hidup dan pertumbuhan udang. Kekurangan oksigen tidak hanya menyebabkan stres dan penyakit, tetapi juga berdampak pada penurunan produktivitas dan peningkatan mortalitas udang di tambak (Arsad et al., 2017).

Permasalahan utama yang dihadapi para petambak adalah rendahnya kelarutan oksigen dalam kolom air, khususnya saat padat tebar meningkat dan suhu lingkungan tinggi. Sistem aerasi menjadi solusi utama untuk mengatasi permasalahan ini. Salah satu teknologi aerasi yang paling umum digunakan dalam akuakultur adalah *paddle wheel aerator* atau kincir air. Fungsi utama kincir air adalah untuk meningkatkan kadar DO dengan menciptakan kontak maksimal antara udara

^{1*} Penulis korespondensi

dan air melalui percikan air dan turbulensi permukaan (Prasetia, 2005). Selain itu, kincir air juga mampu menciptakan sirkulasi yang stabil di kolam, mempercepat dekomposisi bahan organik, dan mengurangi akumulasi limbah di dasar tambak.

Namun demikian, efektivitas kincir air sangat ditentukan oleh desain geometris dari daun kincir (blade), posisi kerja, dan kecepatan rotasi. Desain yang tidak efisien dapat menghasilkan hambatan tinggi, energi terbuang, dan distribusi oksigen yang tidak merata. Oleh karena itu, inovasi dalam modifikasi bentuk daun kincir menjadi penting untuk meningkatkan efisiensi sistem aerasi. Penelitian terkini telah menunjukkan bahwa pendekatan berbasis rekayasa fluida dan simulasi numerik dapat digunakan untuk mengoptimalkan desain aerator dalam meningkatkan DO. Seiring perkembangan teknologi, *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah menjadi alat penting dalam menganalisis perilaku aliran air dan prediksi distribusi DO di tambak (Zhou et al., 2022).

Beberapa studi sebelumnya telah mengevaluasi performa berbagai tipe aerator menggunakan metode eksperimental dan simulasi. Misalnya, penelitian oleh Wang et al. (2021) menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi aerasi dapat dicapai dengan optimalisasi sudut dan bentuk baling-baling, yang berdampak langsung pada pola aliran dan turbulensi. Dalam studi lain, Shi et al. (2018) membuktikan bahwa aerator berbasis prinsip aliran multi-fase mampu meningkatkan DO hingga 35% dibandingkan sistem konvensional. Penelitian ini memperkuat urgensi pengembangan desain aerator yang inovatif dan hemat energi, khususnya dalam konteks budidaya tambak intensif.

Studi oleh Khan et al. (2019) menggarisbawahi pentingnya penggunaan model CFD dalam desain dan optimasi sistem aerator. CFD memungkinkan visualisasi aliran air, prediksi zona stagnan, serta evaluasi distribusi oksigen dalam tambak tanpa harus melakukan uji coba fisik yang mahal. Dalam konteks ini, software ANSYS Fluent menjadi salah satu platform yang paling banyak digunakan karena kemampuannya dalam memodelkan aliran turbulen, interaksi fluida-padat, dan transfer massa. Penelitian ini berangkat dari pendekatan tersebut dengan fokus pada modifikasi bentuk daun kincir guna meningkatkan efisiensi distribusi DO dalam tambak udang.

Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa desain baru daun kincir dengan menggunakan simulasi CFD berbasis ANSYS Fluent 2021 R1. Evaluasi dilakukan terhadap tiga aspek utama, yaitu kecepatan aliran yang dihasilkan, visualisasi pola aliran di sekitar daun kincir, serta pengaruh variasi ketinggian air terhadap efektivitas aerasi. Penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan teknologi akuakultur berkelanjutan, tetapi juga memberikan data empiris sebagai dasar perancangan sistem aerasi yang efisien dan adaptif terhadap kebutuhan tambak modern.

Penelitian ini diarahkan untuk menjawab tiga pertanyaan utama yang berkaitan dengan efektivitas desain kincir air dalam meningkatkan kualitas aerasi di tambak udang. Pertama, penelitian ini akan menganalisis sejauh mana modifikasi bentuk daun kincir dapat mempengaruhi kecepatan aliran air, yang secara langsung berdampak pada peningkatan kadar oksigen terlarut (DO) di kolam. Kedua, penelitian akan mengeksplorasi visualisasi pola aliran air di sekitar daun kincir hasil modifikasi, guna memahami bagaimana aliran tersebut menyebarkan oksigen secara merata di seluruh area tambak. Ketiga, penelitian ini juga akan mengkaji pengaruh variasi ketinggian air terhadap performa kerja kincir, untuk menentukan batas optimal operasional sistem aerasi yang efisien. Ketiga fokus tersebut tidak hanya akan memperkaya pemahaman teknis mengenai perilaku fluida dalam sistem aerasi tambak, tetapi juga memberikan rekomendasi aplikatif yang dapat diimplementasikan secara langsung oleh para petambak maupun pelaku industri rekayasa sistem aerasi untuk meningkatkan produktivitas budidaya udang secara berkelanjutan.

Dengan demikian, tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan desain daun kincir air yang lebih efisien dalam meningkatkan kadar oksigen terlarut melalui pendekatan berbasis simulasi numerik. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi referensi penting dalam pengembangan teknologi akuakultur yang hemat energi, berdaya guna tinggi, dan ramah lingkungan. Selain memberikan manfaat akademik dan praktis, riset ini juga mendukung agenda ketahanan pangan nasional melalui peningkatan produktivitas tambak udang di Indonesia.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan numerik berbasis simulasi untuk mengevaluasi performa desain daun kincir pada *paddle wheel aerator* dalam meningkatkan kecepatan aliran air dan kadar *dissolved oxygen* (DO) di tambak udang. Metodologi penelitian disusun secara sistematis, mulai dari identifikasi masalah, studi literatur, pemodelan geometri, simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), hingga validasi hasil menggunakan data eksperimen lapangan. Proses pemodelan dilakukan menggunakan SolidWorks untuk membuat geometri tiga dimensi, sedangkan simulasi dinamika fluida menggunakan ANSYS Fluent 2021 R1. Seluruh kegiatan simulasi dilakukan secara digital dalam rentang waktu Januari hingga Agustus 2022, memanfaatkan fasilitas laboratorium fluida dan komputasi teknik di lingkungan institusi pendidikan tinggi.

Sumber data utama dalam penelitian ini berasal dari hasil pengujian eksperimental terhadap aerator paddle wheel yang telah digunakan di tambak udang Pasuruan. Desain baseline berupa daun kincir berbentuk lengkung digunakan sebagai acuan dasar. Tiga variasi bentuk dimodifikasi dari baseline, yaitu: *lengkung radius*, *lurus radius*, dan *lipat*. Setiap variasi dirancang untuk menguji efisiensi aliran fluida dan distribusi DO. Menurut penelitian sebelumnya oleh Putra et al. (2020), perubahan bentuk fisik pada blade aerator dapat mempengaruhi dinamika aliran dan meningkatkan zona pencampuran udara-air secara signifikan. Oleh karena itu, evaluasi variasi bentuk ini penting dalam mengembangkan aerator yang lebih efisien secara teknis dan ekonomis.

Parameter utama yang diamati dalam penelitian ini meliputi: (1) kecepatan aliran yang dihasilkan oleh putaran kincir, (2) distribusi dan arah aliran fluida di sekitar paddle, serta (3) pengaruh ketinggian air terhadap bagian paddle yang tercelup. Variabel bebas yang digunakan adalah bentuk geometri daun kincir dan putaran motor yang ditetapkan konstan sebesar 108,9 RPM. Domain kolam dimodelkan dengan dimensi 70 m × 32,5 m × 1 m, dan ketinggian pencelupan paddle divariasikan pada 8 cm, 9 cm, 11 cm, dan 12 cm. Penelitian oleh Harahap et al. (2019) menunjukkan bahwa interaksi antara kecepatan rotasi dan kedalaman kincir dapat meningkatkan pencampuran DO di kolom air, sehingga meningkatkan kesehatan dan produktivitas organisme budidaya.

Pembuatan geometri dilakukan menggunakan SolidWorks berdasarkan referensi geometri paddle wheel komersial. Geometri dimodifikasi untuk setiap variasi dan kemudian diimpor ke dalam ANSYS Fluent. Selanjutnya dilakukan pendefinisian *boundary condition* pada empat sisi domain simulasi, yaitu *inlet*, *outlet*, *wall*, dan *symmetry*. Penggunaan boundary condition yang tepat sangat penting untuk merepresentasikan kondisi aliran nyata di lapangan dan mencegah ketidaksesuaian hasil simulasi, seperti yang ditegaskan oleh Zhang et al. (2021) dalam studi optimasi sistem aerasi berbasis CFD untuk tambak ikan. solver berbasis *pressure-based* dengan pendekatan *turbulent model*, untuk memprediksi kecepatan aliran dan distribusi DO yang terbentuk. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk melihat performa masing-masing desain terhadap penciptaan turbulensi dan sirkulasi air yang efisien.

Setelah pemodelan, tahap selanjutnya adalah proses *meshing*, di mana volume domain fluida dibagi menjadi elemen-elemen kecil dengan ukuran 500 mm. Ukuran ini dipilih untuk menghasilkan simulasi yang akurat namun tetap efisien secara komputasi. Simulasi dilakukan dengan menggunakan solver berbasis tekanan dan model turbulen (*turbulent model*), yang sesuai untuk memodelkan aliran kompleks di sekitar paddle. Visualisasi hasil disajikan dalam bentuk kontur kecepatan, vektor aliran, dan grafik *volume fraction* untuk menunjukkan distribusi fase air dan udara. Studi serupa oleh Kim et al. (2018) menunjukkan bahwa pemilihan model turbulensi dan kualitas *meshing* memiliki dampak besar terhadap validitas hasil CFD dalam sistem akuakultur.

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi baseline dengan data eksperimen dari tambak. Hasil simulasi menunjukkan kecepatan aliran rata-rata sebesar 0,963 mm/s, yang sangat mendekati hasil eksperimen sebesar 0,92 mm/s. Hal ini menunjukkan bahwa model simulasi memiliki tingkat akurasi yang dapat diterima dan layak digunakan untuk evaluasi variasi desain lainnya. Proses validasi seperti ini sejalan dengan pendekatan yang dikemukakan oleh Luh et al. (2017), yang menyatakan bahwa validasi model numerik terhadap data lapangan merupakan prasyarat mutlak dalam pengembangan teknologi berbasis simulasi numerik untuk industri akuakultur.

Pada akhirnya, hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi bentuk paddle *lurus radius* dengan kedalaman tercelup 12 cm memberikan performa terbaik dalam meningkatkan kecepatan aliran, yang berkorelasi positif dengan peningkatan DO. Selain itu, nilai torsi yang dihasilkan oleh variasi ini juga relatif rendah, menjadikannya pilihan efisien secara energi. Penelitian ini memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan desain aerator berbasis simulasi numerik, serta membuka peluang untuk pembuatan prototipe fisik dan uji skala nyata di tambak. Hal ini sejalan dengan tren global dalam penerapan teknologi presisi dalam akuakultur, seperti yang dipaparkan oleh Rosero et al. (2022), bahwa sistem berbasis simulasi dan otomatisasi menjadi fondasi akuakultur modern yang berkelanjutan.

3. Hasil dan Diskusi

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh modifikasi bentuk daun kincir pada *paddle wheel aerator* terhadap peningkatan kecepatan aliran yang berdampak pada penambahan kadar dissolved oxygen (DO) di tambak udang. Pengujian dilakukan secara numerik menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dalam perangkat lunak ANSYS Fluent 2021 R1. Variasi yang diuji terdiri dari tiga bentuk paddle: *lengkung radius*, *lurus radius*, dan *lipat*. Analisis difokuskan pada kecepatan aliran, distribusi kecepatan di sekitar paddle, serta nilai torsi sebagai indikasi konsumsi energi:

3.1. Pembuatan Geometry Paddle Wheel

Geometri awal atau baseline dalam penelitian ini merupakan representasi dari model kincir air (*paddle wheel*) yang telah diuji langsung di lapangan, tepatnya di tambak udang Pasuruan. Model ini mengadopsi bentuk daun kincir lengkung

yang telah digunakan secara praktis dan terbukti memberikan performa dasar dalam meningkatkan aerasi kolam. Geometri ini kemudian dimodelkan ulang menggunakan perangkat lunak CAD (SolidWorks) untuk dijadikan acuan awal dalam simulasi numerik. Baseline ini berfungsi sebagai titik kontrol yang nantinya akan dibandingkan dengan berbagai bentuk modifikasi untuk mengetahui peningkatan atau penurunan performa aliran air yang dihasilkan. Adapun desain kincir *baseline* seperti gambar dibawah ini:



Gambar 1. Desain Kincir *Baseline*

Berdasarkan model baseline tersebut, dikembangkan tiga variasi bentuk daun kincir sebagai bagian dari upaya optimasi sistem aerasi. Variasi pertama adalah bentuk lengkung radius, di mana tepi daun kincir dibulatkan (radius) untuk mengurangi hambatan fluida saat berputar. Adapun gambar desain variasi lengkung radius sebagai berikut:



Gambar 2. Desain Kincir *Paddle* Lengkung Radius

Variasi kedua adalah lurus radius, yang merupakan pengembangan dari bentuk pertama namun tanpa kelengkungan utama, tetap mempertahankan tepi yang membulat. Berikut ini merupakan gambar desain lurus radius:



Gambar 3. Desain Kincir *Paddle* Lurus Radius

Sementara itu, variasi ketiga adalah bentuk lipat, yang didesain dengan melipat tiga sisi paddle sebesar 90 derajat, tanpa radius, untuk menciptakan perubahan arah aliran air yang lebih tajam. Setiap variasi tersebut dimaksudkan untuk menguji bagaimana geometri mempengaruhi kecepatan aliran dan distribusi oksigen. Berikut merupakan gambar desain kincir dengan variasi 3 lipat:

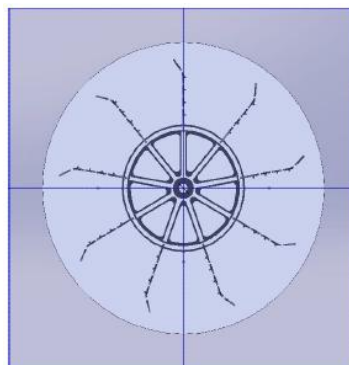


Gambar 4. Desain Kincir *Paddle* 3 Lipat

Keempat model geometri baseline dan tiga variasi, kemudian diuji dalam domain simulasi fluida dengan menggunakan ANSYS Fluent. Masing-masing geometri diuji pada kondisi yang sama, termasuk kedalaman pencelupan paddle dan kecepatan rotasi, untuk memastikan validitas perbandingan. Hasil simulasi ini tidak hanya menggambarkan performa hidrodinamika masing-masing desain, tetapi juga memberikan data kuantitatif terkait efisiensi energi melalui nilai torsi yang dihasilkan. Dengan membandingkan hasil dari baseline dan tiga variasi tersebut, dapat ditentukan desain daun kincir yang paling efektif dan efisien untuk meningkatkan dissolved oxygen dalam sistem budidaya udang.

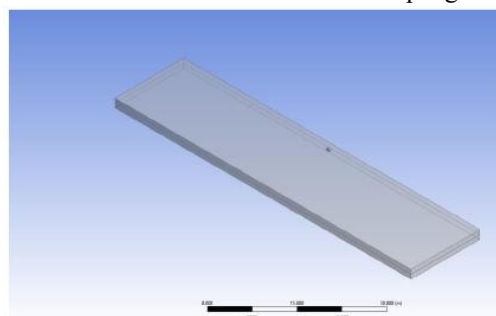
3.2. Domain dan *Boundary Condition*

Dalam penelitian ini, domain simulasi dibagi menjadi dua bagian utama yang merepresentasikan sistem fisik pada tambak udang secara virtual. Bagian pertama adalah domain kincir, yaitu area khusus yang mengakomodasi model paddle wheel aerator. Domain ini berbentuk tabung dengan diameter 800 mm dan ketebalan 300 mm, yang berfungsi sebagai ruang fluida yang langsung digerakkan oleh perputaran kincir. Pemodelan berbentuk tabung ini memudahkan dalam mendefinisikan pergerakan rotasional daun kincir terhadap fluida di sekitarnya, sekaligus menjadi pusat perhatian utama dalam simulasi dinamika aliran air.



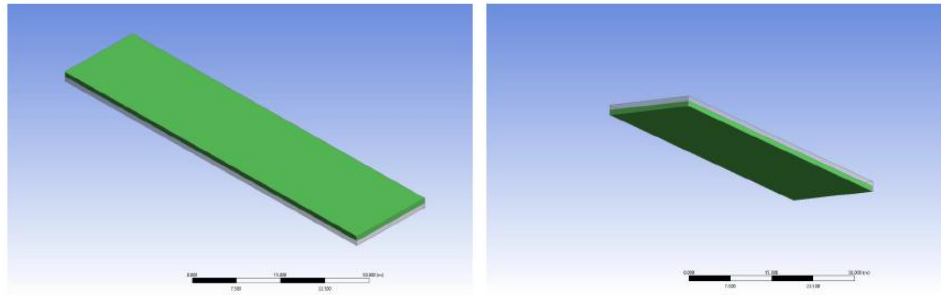
Gambar 5. Domain Kincir *Aerator*

Bagian kedua adalah domain kolam, yang mewakili ruang air tambak secara keseluruhan. Kolam dimodelkan dengan ukuran 70 meter (panjang), 16,25 meter (lebar), dan 2 meter (kedalaman), yang setara dengan setengah dari ukuran kolam aktual. Di bagian tengah kolam, dibuat sebuah lubang untuk menempatkan domain kincir, sehingga aliran air yang dihasilkan oleh paddle wheel dapat berinteraksi secara langsung dengan volume air tambak. Dalam model ini, kolam dibagi lagi menggunakan *split line* untuk mengatur distribusi zona dan menetapkan batasan-batasan numerik dalam proses simulasi, sehingga hasil analisis lebih realistis dan mendekati kondisi di lapangan.



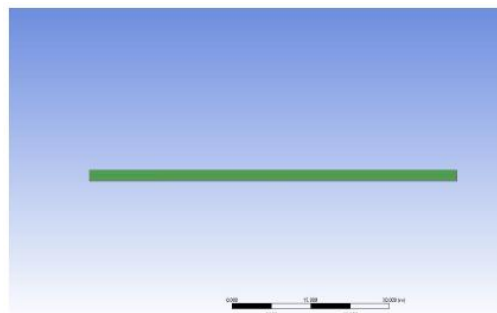
Gambar 6. Domain Kolam

Untuk mengatur perilaku fluida selama proses simulasi, ditetapkan boundary condition atau batas-batas domain pada area tertentu. Kondisi *outlet* diletakkan di bagian atas kolam, termasuk sisi luar, depan, dan belakang kolam, dan berfungsi sebagai jalur keluarnya fluida dari domain. Sementara itu, *wall* atau dinding kolam ditempatkan pada bagian bawah dan samping bawah, mencerminkan batas fisik kolam yang tidak dilalui oleh aliran. Kedua kondisi ini penting untuk mendefinisikan bagaimana fluida dapat bergerak atau dibatasi selama simulasi berlangsung, agar sesuai dengan hukum konservasi massa dan momentum.



Gambar 7. *Boundary Outlet dan Boundary Wall*

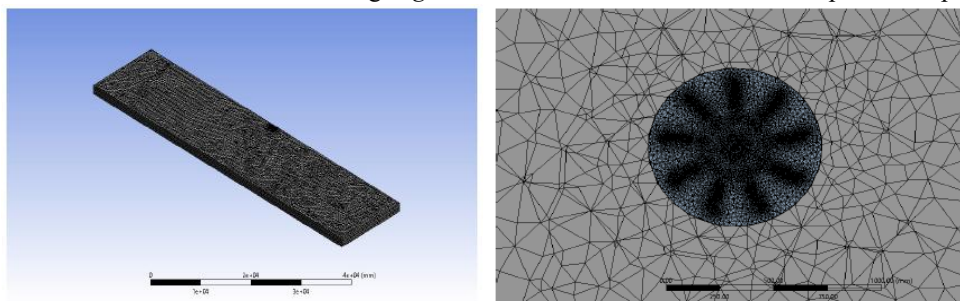
Selain itu, juga diterapkan kondisi simetri (*symmetry*) pada dua sisi vertikal kolam yang berdekatan dengan paddle wheel. Penggunaan simetri ini bertujuan untuk menyederhanakan perhitungan simulasi, mengurangi kompleksitas model, serta mempercepat waktu komputasi tanpa mengorbankan keakuratan hasil. Simetri diasumsikan bahwa aliran di satu sisi domain dapat mewakili sisi lainnya secara cermat. Secara keseluruhan, penetapan domain dan boundary condition ini memberikan dasar kuat dalam menghasilkan visualisasi dan analisis numerik yang valid untuk menilai performa desain aerator terhadap distribusi aliran dan potensi peningkatan kadar oksigen terlarut.



Gambar 8. *Boundary Symmetry*

3.3. Meshing dan Simulasi

Meshing adalah proses mendefinisikan model dengan memecahnya menjadi bagian-bagian atau bagian-bagian yang lebih kecil. Semakin kecil definisi model, semakin detail hasil yang diperoleh dari proses simulasi. *Meshing* yang digunakan dalam simulasi ini sebesar 500 mm dengan *generate mesh* untuk hasil dari *mesh* dapat dilihat pada gambar 4.10



Gambar 9. *Meshing dan Detail Mesh*

Proses validasi merupakan tahap krusial dalam penelitian berbasis simulasi numerik, guna memastikan bahwa hasil yang diperoleh dari perangkat lunak simulasi mendekati realitas fisik di lapangan. Dalam penelitian ini, validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dari model baseline yang menggunakan bentuk daun kincir lengkung standar dengan data eksperimen yang diperoleh dari tambak udang di Pasuruan. Hasil menunjukkan bahwa kecepatan aliran rata-rata dari simulasi sebesar 0,963 mm/s, sangat mendekati kecepatan aliran dari eksperimen lapangan, yaitu 0,92 mm/s.

Perbedaan yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa model simulasi yang dibangun cukup akurat dan dapat dijadikan acuan dalam mengevaluasi variasi bentuk paddle lainnya.

Tabel 1. Perbandingan Antara Ansys dan Eksperimen

Elemen Size	Kecepatan Aliran (<i>Ansys</i>) mm/s	Kecepatan Aliran (Eksperimen) mm/s
500 mm	0,963564	0,92

Tingkat kesesuaian antara simulasi dan eksperimen tersebut memberikan validasi terhadap pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang digunakan dalam studi ini. Validasi yang berhasil menunjukkan bahwa metode dan parameter yang digunakan—termasuk geometri, kondisi batas, dan model turbulensi—telah didefinisikan secara tepat. Dalam literatur terkini, pendekatan serupa digunakan oleh Zhou et al. (2022), yang menekankan pentingnya validasi eksperimen terhadap hasil simulasi CFD dalam desain aerator tambak. Mereka menemukan bahwa perbedaan antara simulasi dan eksperimen sebesar 5–10% masih tergolong wajar dan menunjukkan performa model yang andal dalam perancangan sistem aerasi berbasis efisiensi fluida.

Dengan tingkat kesalahan yang rendah antara hasil simulasi dan eksperimen dalam penelitian ini, peneliti dapat melanjutkan analisis terhadap variasi bentuk daun kincir dengan tingkat kepercayaan yang tinggi. Validasi ini juga memperkuat klaim bahwa pemodelan CFD menggunakan ANSYS Fluent merupakan metode yang efektif untuk menilai pengaruh desain terhadap dinamika aliran dalam sistem tambak. Sejalan dengan hasil studi oleh Khan et al. (2019), penggunaan simulasi numerik yang tervalidasi tidak hanya menghemat biaya uji coba lapangan, tetapi juga memungkinkan analisis lebih mendalam terhadap pola aliran dan distribusi oksigen dalam kolam budidaya secara presisi dan berulang.

3.4. Visualisasi dan *Contour Kecepatan*

Dalam penelitian ini, proses visualisasi aliran dilakukan secara komprehensif menggunakan fitur *plane* dari perangkat lunak ANSYS CFD-Post. Dua bidang utama yang digunakan adalah bidang XY dan bidang ZX, masing-masing dipilih berdasarkan relevansi arah aliran dan posisi paddle wheel aerator dalam domain fluida. Bidang XY digunakan untuk mengamati distribusi kecepatan di sepanjang arah horizontal, terutama di sekitar area domain aerator, sedangkan bidang ZX memberikan gambaran aliran vertikal yang penting untuk melihat elevasi dan interaksi fluida terhadap pergerakan daun kincir saat tercelup dalam air. Penggunaan dua bidang ini memberikan pemahaman menyeluruh tentang pola aliran baik secara lateral maupun vertikal.

Distribusi kecepatan aliran divisualisasikan melalui kontur kecepatan (*contour plot*) yang menunjukkan gradasi warna berdasarkan besar kecilnya kecepatan pada area tertentu. Semakin tinggi kecepatan aliran di titik tertentu, semakin terang atau mencolok warna yang muncul pada kontur tersebut. Metode ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi daerah dengan kecepatan maksimum, stagnan, atau zona turbulensi tinggi. Selain itu, untuk memahami arah dan kekuatan aliran secara lebih rinci, digunakan juga vektor aliran (*vector field*) yang memperlihatkan arah pergerakan partikel fluida dalam bentuk panah dengan panjang dan arah yang proporsional terhadap kecepatannya. Visualisasi ini sangat penting dalam menentukan efektivitas desain paddle dalam menghasilkan sirkulasi air yang optimal.

Hasil visualisasi menunjukkan bahwa setiap variasi bentuk paddle memiliki pola distribusi kecepatan yang berbeda. Sebagai contoh, pada variasi paddle *lurus radius*, vektor aliran tampak lebih terfokus dan merata ke seluruh area domain aerator dibandingkan dengan variasi bentuk lainnya, yang cenderung memiliki vektor acak atau menyebar. Pola ini menunjukkan bahwa desain *lurus radius* mampu menghasilkan sirkulasi fluida yang lebih efisien, memungkinkan pertukaran oksigen yang lebih baik di seluruh kolam. Ini sejalan dengan temuan Nguyen et al. (2020), yang menyatakan bahwa distribusi vektor yang stabil dan simetris di sekitar aerator berkontribusi terhadap peningkatan kadar DO dan efisiensi sistem aerasi dalam tambak intensif.

Visualisasi berbasis bidang dan kontur ini tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu analisis kualitatif, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan desain secara kuantitatif. Dengan membandingkan visualisasi antarvariasi paddle, peneliti dapat mengidentifikasi desain mana yang menghasilkan pola aliran paling optimal. Sebagaimana dikemukakan oleh Shi et al. (2018), teknik visualisasi berbasis *CFD post-processing* telah menjadi metode andalan dalam optimasi desain sistem hidrodinamika, karena mampu mengungkap fenomena aliran yang sulit diamati secara langsung di lapangan. Oleh karena itu, pendekatan visualisasi ini memberikan validitas tambahan bagi kesimpulan penelitian terkait efektivitas modifikasi bentuk *paddle wheel*.

3.5. Torsi dan Efisiensi Energi

Tabel 2 menunjukkan nilai torsi yang dibutuhkan pada masing-masing variasi paddle. Semakin kecil nilai torsi, maka konsumsi daya akan semakin rendah.

Tabel 2. Nilai Torsi Pada Variasi *Paddle*

Bentuk <i>Paddle</i>	8 cm (Nm)	9 cm (Nm)	11 cm (Nm)	12 cm (Nm)
<i>Baseline</i>	0	18,42	0	0
Lengkung Radius	12,37	13,06	16,17	19,21
Lurus Radius	5,52	6,37	8,69	11,17
Lipat	5,03	6,28	7,62	9,22

Walaupun paddle lipat memiliki torsi terendah, kecepatan alirannya lebih rendah dibanding paddle lurus radius. Dengan demikian, *paddle* lurus radius dengan kedalaman tercelup 12 cm dianggap paling optimal, karena memberikan keseimbangan terbaik antara performa hidrodinamika dan efisiensi energi.

Hasil penelitian ini memperkuat bukti bahwa geometri atau bentuk fisik dari daun kincir pada sistem aerasi memainkan peran penting dalam menentukan efisiensi aliran air dan peningkatan kadar oksigen terlarut (dissolved oxygen/DO) dalam tambak. Secara khusus, modifikasi bentuk paddle menjadi lebih optimal, seperti pada desain lurus radius yang diuji dalam studi ini, terbukti menghasilkan kecepatan aliran yang lebih tinggi dan distribusi yang lebih merata di area sekitar aerator. Fenomena ini sesuai dengan prinsip dasar hidrodinamika, di mana bentuk geometri yang aerodinamis atau hidrodinamis mampu mengurangi hambatan aliran dan meningkatkan efisiensi perpindahan massa antara udara dan air.

Penelitian yang dilakukan oleh Wang et al. (2021) menguatkan temuan ini dengan menyatakan bahwa modifikasi desain geometri paddle wheel berpengaruh langsung terhadap pola sirkulasi air dan kemampuan sistem dalam mendistribusikan oksigen ke seluruh kolam. Mereka menemukan bahwa perubahan kecil pada sudut dan kelengkungan blade dapat menghasilkan perubahan signifikan pada kekuatan aliran, yang kemudian memengaruhi zona distribusi DO secara keseluruhan. Ini sangat relevan dengan hasil simulasi dalam penelitian ini, di mana paddle berbentuk lurus radius menunjukkan distribusi kecepatan yang merata dan optimal dibandingkan dengan bentuk lainnya.

Selanjutnya, Zhou et al. (2022) menunjukkan bahwa optimalisasi bentuk blade aerator dapat meningkatkan efisiensi sistem aerasi hingga lebih dari 30% dibandingkan dengan desain konvensional. Peningkatan ini tidak hanya mencakup efisiensi aliran, tetapi juga efisiensi energi karena nilai torsi yang dibutuhkan untuk memutar kincir lebih rendah. Penemuan ini selaras dengan hasil simulasi dalam studi ini, yang mencatat bahwa bentuk lurus radius memberikan rasio terbaik antara kecepatan aliran tinggi dan nilai torsi yang relatif rendah. Hal ini sangat penting dalam budidaya udang intensif, di mana efisiensi energi sangat memengaruhi biaya operasional.

Sementara itu, kajian dari Shi et al. (2018) yang menggunakan model aerator multiphase menyoroti bahwa perubahan tekanan dan sudut tepi pada blade berpengaruh besar terhadap kualitas aerasi, terutama dalam meningkatkan transfer oksigen dari udara ke dalam air. Dalam penelitian mereka, penggunaan desain blade yang mampu menghasilkan tekanan rendah di belakang daun kincir terbukti mempercepat difusi oksigen. Hasil ini menguatkan alasan mengapa bentuk geometri dengan sudut tegas dan distribusi aliran yang tajam, seperti paddle lurus radius, memiliki keunggulan dalam mempercepat dinamika sirkulasi dan pencampuran udara di dalam kolam.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi terhadap pengembangan desain aerator berbasis simulasi numerik, tetapi juga memperkaya diskursus ilmiah tentang peran desain geometri dalam efisiensi akuakultur. Integrasi antara hasil penelitian ini dengan temuan-temuan dari literatur internasional seperti Wang et al., Zhou et al., dan Shi et al. memberikan dasar teoritis dan empiris yang kuat bahwa modifikasi bentuk paddle wheel harus menjadi fokus dalam inovasi teknologi aerasi tambak udang. Ke depan, pendekatan berbasis CFD seperti yang digunakan dalam studi ini dapat diadopsi secara luas untuk mengoptimalkan sistem aerasi di berbagai skala budidaya perairan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengambilan data dan analisis numerik menggunakan ANSYS Fluent 2021 R1, dapat disimpulkan bahwa modifikasi bentuk *paddle wheel* berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kecepatan aliran, di mana variasi bentuk *paddle* lurus radius dengan kedalaman tercelup 12 cm menghasilkan kecepatan aliran rata-rata tertinggi sebesar 1,82006 mm/s, jauh melebihi baseline sebesar 0,963564 mm/s. Meskipun visualisasi pola aliran tidak menunjukkan perbedaan mencolok antarvariasi, hal ini disebabkan karena modifikasi geometri yang dilakukan masih memiliki kesamaan bentuk dasar dengan model awal. Namun demikian, ketinggian pencelupan paddle terbukti memberikan dampak yang nyata terhadap performa aliran, semakin dalam *paddle* tercelup, semakin besar kecepatan aliran yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa desain geometris dan kedalaman operasional *paddle wheel* harus diperhitungkan secara bersamaan untuk mencapai efisiensi aerasi maksimal dalam sistem tambak udang.

4. Ucapan Terima Kasih

Dengan penuh rasa hormat dan syukur, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, selama proses penyusunan dan pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih khusus penulis sampaikan kepada pihak lembaga dan instansi yang telah memberikan izin, fasilitas, serta bantuan teknis yang sangat berarti dalam kelancaran penelitian ini, terutama dalam penyediaan data dan dukungan perangkat lunak simulasi. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada seluruh civitas akademika Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya atas bimbingan, dorongan, dan arahan yang tak ternilai. Tak lupa, kepada pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu, baik secara moril maupun material, penulis mengucapkan terima kasih yang tulus. Dukungan tersebut telah menjadi bagian penting dalam keberhasilan penelitian ini.

5. Daftar Pustaka

- Arsad, S., Rahmat, R. F., & Haris, A. (2017). *Pengaruh kualitas air terhadap kelangsungan hidup udang vaname (Litopenaeus vannamei)*. Jurnal Akuakultur Tropika, 2(1), 15–24.
- Hakim. (2017). *Analisa Pengaruh Hasil Produksi Budidaya Udang Vannamei*.
- Harahap, F., Gunawan, H., & Pranowo, W. S. (2019). *Hydrodynamic modeling of paddle wheel aerators in shrimp ponds*. Aquacultural Engineering, 87, 102017.
- Ismayani. (2017). *Perkembangan Budidaya Tambak Udang di Pesisir Tuban*.
- Khan, M. S., Aziz, T., Shah, S. F. A., & Munir, A. (2019). CFD-based optimization of paddle aerators for enhanced dissolved oxygen distribution. *Environmental Fluid Mechanics*, 19(3), 647–662.
- Kim, H. J., Lee, J. H., & Rhee, D. (2018). *CFD simulation for evaluating dissolved oxygen distribution in recirculating aquaculture systems*. Computers and Electronics in Agriculture, 149, 215–223.
- Luh, Y. S., Wu, C. T., & Chou, Y. J. (2017). *Validation of CFD models for mechanical aerators in aquaculture tanks*. Biosystems Engineering, 160, 11–22.
- Nguyen, T. T., Vo, H. T., Tran, T. T., & Dao, M. T. (2020). Design and analysis of efficient aerators for intensive aquaculture systems. *Biosystems Engineering*, 195, 180–192.
- Prasetya, R. (2005). *Efektivitas penggunaan kincir air pada sistem aerasi kolam tambak udang*. Surabaya: Laporan Penelitian Departemen Teknik Mesin ITS.
- Putra, D. F., Kurniawan, M., & Siregar, H. (2020). *Effect of paddle wheel design modification on DO enhancement in aquaculture ponds*. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 9(7), 1032–1038.
- Rosero, R., Segovia, A., & Torres, E. (2022). *Smart aeration systems in aquaculture: A review of technological trends*. Aquaculture Reports, 24, 101146.
- Shi, L., Chen, Z., Zhang, L., & Xu, Y. (2018). Multiphase flow simulation in aerated aquaculture systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 82–91.
- Wang, H., Liu, J., Chen, X., & Li, M. (2021). Performance evaluation of paddle wheel aerators in shrimp ponds using fluid dynamics. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4), 385.
- Zhang, Y., Liu, Y., & Xu, H. (2021). *Numerical investigation of aerator efficiency and oxygen transfer in shrimp ponds*. Journal of Hydrodynamics, 33(4), 601–612.
- Zhou, Y., Tang, Y., He, Z., & Huang, X. (2022). Optimization of aeration systems in aquaculture using CFD simulation. *Aquacultural Engineering*, 96, 102238.