

Studi Keunikan Sistem Rangka Tulang Rawan Pada Ikan Pari Manta (*Mobula birostris*) Dalam Mendukung Pola Pergerakan

Zainul Hasanah^{*1}, Dina Fitri Amalia², Siti Adhulil Jannah³, Titi Oktaviani⁴, Jodion Siburian⁵, Afreni Hamidah⁶, Desfaur Natalia⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jambi, Indonesia

Email: zainulhasanah647@gmail.com

Abstrak

Ikan pari manta (*Mobula birostris*) merupakan salah satu spesies ikan kartilaginosa yang memiliki sistem rangka berbasis tulang rawan dengan karakteristik fleksibel dan ringan. Struktur tersebut berperan penting dalam mendukung kemampuan locomotion serta efisiensi gerak di lingkungan laut terbuka. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik sistem rangka tulang rawan pada pari manta, menganalisis hubungannya dengan pola pergerakan, serta mengkaji keunggulan biomekanik sistem kartilago dalam mendukung efisiensi hidrodinamika. Penelitian menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan pendekatan kualitatif deskriptif melalui pengumpulan artikel ilmiah dari Google Scholar, Scopus, PubMed, dan ScienceDirect. Proses seleksi literatur dilakukan menggunakan tahapan *PRISMA* meliputi *identification*, *screening*, *eligibility*, dan *included*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur kartilago pada pari manta memiliki fleksibilitas tinggi sehingga mampu meningkatkan stabilitas gerakan, mengurangi hambatan air, serta mendukung efisiensi energi selama berenang dan migrasi. Fleksibilitas sirip dada dan kemampuan adaptasi hidrodinamika tubuh menjadikan pari manta sebagai salah satu organisme laut dengan sistem biomekanika yang sangat efisien. Kajian ini juga menunjukkan bahwa karakteristik biomekanika pari manta berpotensi menjadi dasar pengembangan teknologi biomimetik dan konservasi organisme laut.

Kata kunci: Biomekanik, Ikan pari manta, *Mobula birostris*, Pola gerakan, Tulang rawan

Abstract

The manta ray (*Mobula birostris*) is one of the cartilaginous fish species possessing a cartilage-based skeletal system characterized by flexibility and lightweight structure. This anatomical structure plays an essential role in supporting locomotion ability and movement efficiency in the open marine environment. This study aimed to identify the characteristics of the cartilaginous skeletal system in manta rays, analyze its relationship with movement patterns, and examine the biomechanical advantages of the cartilage system in supporting hydrodynamic efficiency. The study employed a *Systematic Literature Review* (SLR) method using a descriptive qualitative approach through the collection of scientific articles from Google Scholar, Scopus, PubMed, and ScienceDirect. The literature selection process followed *PRISMA* stages consisting of *identification*, *screening*, *eligibility*, and *included* phases. The findings revealed that the cartilaginous structure of manta rays possesses high flexibility, which enhances movement stability, reduces water resistance, and supports energy efficiency during swimming and migration. The flexibility of the pectoral fins and the body's hydrodynamic adaptation capability make manta rays one of the marine organisms with highly efficient biomechanical systems. This study also indicates that the biomechanical characteristics of manta rays have potential applications in the development of biomimetic technology and marine organism conservation.

Keywords: Manta ray, *Mobula birostris*, Cartilage, Biomechanics, Movement patterns

1. PENDAHULUAN

Ikan pari manta (*Mobula birostris*) merupakan salah satu spesies ikan kartilaginosa yang memiliki karakteristik anatomi unik dibandingkan ikan bertulang sejati. Kelompok ikan kartilaginosa atau *Chondrichthyes* memiliki sistem rangka yang tersusun atas tulang rawan sehingga menghasilkan struktur tubuh yang lebih fleksibel dan ringan. Struktur kartilago tersebut berperan penting dalam

menunjang kemampuan adaptasi serta efisiensi gerak di lingkungan laut. Root et al. (2021) menjelaskan bahwa jaringan kartilago pada vertebrata primitif menunjukkan kemampuan struktural yang mendukung fleksibilitas dan ketahanan mekanik tubuh. Sistem rangka berbasis kartilago pada ikan pari manta juga memungkinkan distribusi gaya gerak yang lebih stabil ketika berenang di perairan terbuka. Karakteristik tersebut menjadikan pari manta sebagai salah satu organisme laut dengan efisiensi hidrodinamika yang tinggi dalam melakukan migrasi maupun aktivitas pencarian makan.

Pari manta dikenal memiliki ukuran tubuh besar dengan sirip dada berbentuk menyerupai sayap yang mendukung pola pergerakan meluncur dan mengepak secara ritmis. Struktur tubuh yang lebar dan fleksibel memungkinkan ikan ini bergerak dengan konsumsi energi yang relatif rendah. Kajian biomekanika menunjukkan bahwa pola gerakan sirip pada pari manta mampu menghasilkan dorongan hidrodinamik yang efisien sehingga mengurangi hambatan air selama berenang. Cao et al. (2023) menyatakan bahwa mekanisme gerakan mengepak dan meluncur pada *manta ray* memberikan inspirasi penting dalam pengembangan robot bawah laut berbasis biomimetik. Penelitian Liu et al. (2022) juga memperlihatkan bahwa fleksibilitas material lunak yang meniru struktur tulang rawan pari manta mampu meningkatkan efisiensi gerakan sirip robotik di lingkungan akuatik. Temuan tersebut menunjukkan bahwa sistem rangka tulang rawan tidak hanya berfungsi sebagai penopang tubuh, tetapi juga berperan dalam optimalisasi pola *locomotion* dan kestabilan gerakan.

Kajian mengenai hubungan antara struktur rangka dan pola pergerakan pari manta terus berkembang melalui pendekatan biomekanika dan bioinspirasi teknologi kelautan. Ma et al. (2022) menjelaskan bahwa karakteristik hidrodinamika pada gerakan meluncur pari manta dipengaruhi oleh fleksibilitas tubuh dan koordinasi sirip dada selama berenang. Cao et al. (2022) menambahkan bahwa fleksibilitas struktur menyerupai tulang pada sirip mampu meningkatkan performa hidrodinamika dan efisiensi propulsi di dalam air. Penelitian Cortés Torres et al. (2024) turut memperlihatkan bahwa model sirip *bioinspiratif* berbasis kinematika pari manta memiliki kemampuan gerak yang stabil dan adaptif terhadap tekanan fluida. Setyawan et al. (2024) juga menunjukkan bahwa pola gerakan pari manta memiliki hubungan erat dengan perilaku biologis dan aktivitas ekologisnya di habitat terumbu karang. Kondisi tersebut memperlihatkan bahwa sistem rangka tulang rawan pada pari manta memiliki peranan multidimensional yang mencakup aspek anatomi, biomekanika, hingga adaptasi ekologis.

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk menganalisis berbagai hasil penelitian mengenai sistem rangka tulang rawan dan hubungannya dengan pola pergerakan ikan pari manta. Kajian ini difokuskan pada identifikasi karakteristik kartilago, mekanisme biomekanika gerak, serta keunggulan hidrodinamika yang dimiliki *Mobula birostris*. Rumusan masalah dalam penelitian ini meliputi: 1) bagaimana karakteristik sistem rangka tulang rawan pada ikan pari manta?; 2) bagaimana sistem rangka tersebut mendukung pola pergerakan?; dan 3) apa keunggulan biomekanik sistem kartilago pada pari manta? Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur rangka tulang rawan pari manta, menganalisis hubungan struktur tubuh dengan pola gerak, serta mengkaji keunggulan biomekanik sistem kartilago pada spesies tersebut. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi akademis dalam pengembangan ilmu biomekanika laut, memperluas pemahaman biologis mengenai ikan kartilaginosa, serta menjadi referensi bagi penelitian bioinspirasi dan konservasi organisme laut.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode *Systematic Literature Review* (SLR). Metode SLR digunakan untuk mengidentifikasi, mengkaji, dan mensintesis berbagai penelitian yang berkaitan dengan sistem rangka tulang rawan pada ikan pari manta (*Mobula birostris*) serta hubungannya dengan pola pergerakan di lingkungan laut. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai karakteristik biomekanika pari manta berdasarkan hasil penelitian terdahulu yang relevan. Proses pencarian literatur dilakukan melalui beberapa basis data ilmiah, yaitu Google Scholar, Scopus, PubMed, dan ScienceDirect. Pencarian artikel menggunakan kata kunci "*Mobula birostris*", "*cartilaginous skeleton*", "*manta ray locomotion*", dan "*biomechanics*". Kombinasi kata kunci tersebut digunakan untuk memperoleh artikel yang membahas anatomi kartilago, fleksibilitas rangka, mekanisme gerak, serta efisiensi hidrodinamika pari manta.

Tahapan pengumpulan data dilakukan secara sistematis melalui proses *identification, screening, eligibility, dan included* berdasarkan alur PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Tahap identifikasi dilakukan dengan mengumpulkan seluruh artikel yang diperoleh dari basis data sesuai kata kunci penelitian. Tahap screening dilakukan dengan menyeleksi judul dan abstrak artikel berdasarkan kesesuaian topik penelitian. Tahap *eligibility* dilakukan dengan membaca keseluruhan isi artikel untuk memastikan relevansi substansi terhadap fokus kajian penelitian. Artikel yang memenuhi seluruh tahapan seleksi kemudian dimasukkan ke tahap *included* sebagai sumber utama analisis penelitian. Kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi artikel ilmiah yang diterbitkan dalam rentang 10 tahun terakhir, membahas struktur tubuh atau pola gerak pari manta, serta berasal dari jurnal nasional maupun internasional. Kriteria eksklusi meliputi artikel non-ilmiah, artikel tanpa akses *full text*, dan artikel yang tidak relevan dengan pembahasan biomekanika maupun sistem kartilago.

Teknik analisis data dilakukan menggunakan analisis tematik dan sintesis naratif terhadap seluruh artikel yang telah lolos proses seleksi. Analisis tematik digunakan untuk mengidentifikasi pola pembahasan utama terkait morfologi pari manta, struktur kartilago, fleksibilitas rangka, pola pergerakan, dan efisiensi hidrodinamika. Sintesis naratif dilakukan dengan membandingkan hasil penelitian terdahulu untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan antara sistem rangka tulang rawan dan kemampuan *locomotion* pari manta. Hasil analisis kemudian disusun secara sistematis untuk menghasilkan interpretasi ilmiah mengenai keunikan biomekanika pari manta dalam mendukung aktivitas berenang dan adaptasi terhadap lingkungan laut.

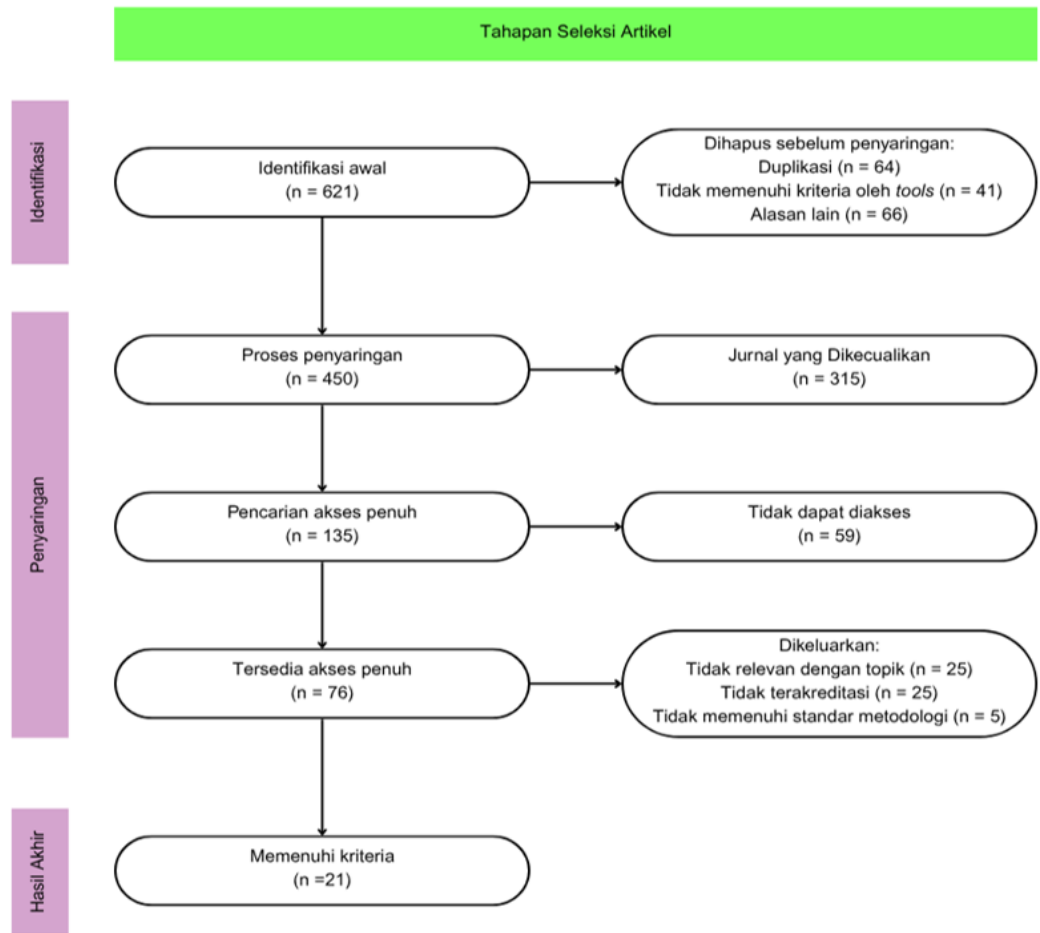
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil

Tahap identifikasi literatur dalam penelitian ini menghasilkan 621 rekaman artikel yang diperoleh dari berbagai database ilmiah nasional dan internasional dengan fokus pembahasan sistem rangka tulang rawan, biomekanika, serta pola pergerakan ikan pari manta (*Mobula birostris*) pada rentang publikasi 2022–2026. Proses seleksi awal menyebabkan 171 rekaman dieliminasi, yang terdiri atas 64 artikel terduplikasi, 41 artikel yang tidak relevan dengan fokus kajian, serta 66 rekaman yang tidak dapat dianalisis lebih lanjut karena kendala akses maupun permasalahan teknis lainnya. Sebanyak 450 rekaman yang tersisa selanjutnya melalui tahap *screening* berdasarkan judul dan abstrak guna menilai kesesuaian topik dengan pembahasan struktur kartilago, fleksibilitas rangka, biomekanika locomotion, efisiensi hidrodinamika, serta adaptasi gerak pari manta di lingkungan laut. Hasil penyaringan menunjukkan bahwa 315 artikel ini merupakan contoh penggunaan sub-bab pada paper. Sub-bab diperbolehkan untuk dimasukkan tidak memenuhi kesesuaian dengan tujuan penelitian sehingga hanya 135 artikel yang diteruskan ke tahap evaluasi *full-text*.

Sebanyak 59 artikel dari 135 artikel yang lolos tahap *screening* awal tidak dapat diakses secara penuh akibat keterbatasan akses database dan sistem *paywall* jurnal. Kondisi tersebut menyebabkan hanya 76 artikel yang dapat dianalisis pada tahap *eligibility assessment*. Hasil evaluasi mendalam memperlihatkan bahwa 55 artikel tidak memenuhi kriteria inklusi penelitian, yang meliputi 25 artikel yang tidak secara spesifik membahas biomekanika maupun struktur tubuh pari manta, 25 artikel yang dipublikasikan pada jurnal yang tidak terindeks maupun tidak melalui proses *peer-review*, serta 5 artikel dengan kualitas metodologi yang dinilai belum memadai untuk kebutuhan *systematic literature review*. Seluruh proses seleksi artikel dilaksanakan mengikuti tahapan PRISMA sehingga diperoleh 21 artikel akhir yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan layak digunakan dalam penelitian *systematic review* ini.

Sebanyak 10 artikel utama dari total 21 artikel yang memenuhi kriteria inklusi kemudian disajikan dalam bentuk tabel untuk memberikan gambaran sistematis mengenai perkembangan penelitian terkait struktur kartilago, biomekanika gerakan, fleksibilitas tubuh, serta efisiensi hidrodinamika pada ikan pari manta. Ringkasan artikel memuat karakteristik penelitian, fokus kajian biomekanika, metode analisis, serta temuan utama terkait hubungan sistem rangka tulang rawan dengan pola pergerakan pari manta di lingkungan laut. Penyajian tabel dilakukan untuk mempermudah pemetaan kecenderungan penelitian, variasi pendekatan biomekanika yang digunakan, serta arah perkembangan kajian biologi kelautan dan biomimetik berbasis organisme kartilaginosa.



Gambar 1. Tahapan Seleksi Artikel
Sumber: Olahan Penulis (2026)

Tabel 1. Judul Tabel Hasil Litertur Review

No	Penulis & Tahun	Jenis Penelitian	Fokus Penelitian	Metode	Hasil Utama
1	Beale et al. (2025)	Penelitian lapangan	Perilaku penyelaman pari manta oseanik	Telemetry dan pelacakan pergerakan	Pari manta memiliki kemampuan penyelaman dalam yang mendukung efisiensi migrasi dan pencarian makan di laut terbuka.
2	Cao, Ma, et al. (2022)	Ekspresi mental biomimetik	Optimasi postur gerak robot pari manta	Simulasi biomekanika dan evaluasi gerakan	Fleksibilitas bentuk tubuh dan sirip meningkatkan efisiensi gerak serta stabilitas hidrodinamika.

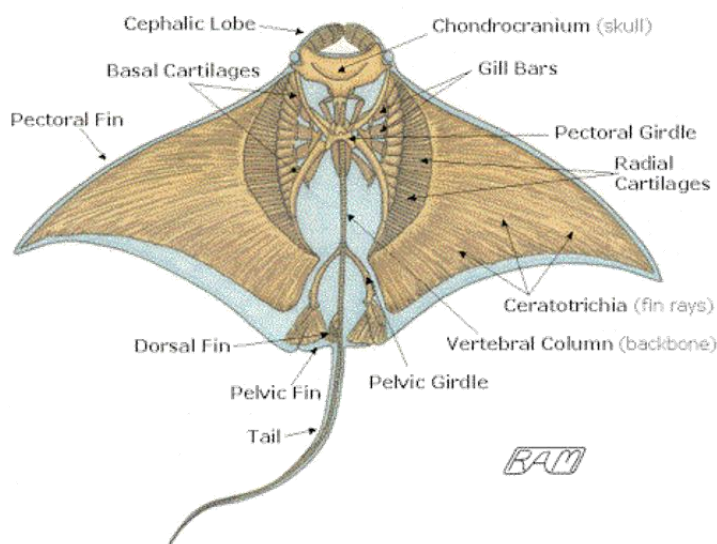
No	Penulis & Tahun	Jenis Penelitian	Fokus Penelitian	Metode	Hasil Utama
3	Zhou et al. (2024)	Simulasi numerik	Hidrodinamika pari manta saat keluar dari air	Analisis numerik fluida	Bentuk tubuh pari manta menghasilkan distribusi tekanan fluida yang stabil dan efisien.
4	Liu et al. (2025)	Simulasi CFD	Performa hidrodinamika pari manta	<i>Model 2D Computational Fluid Dynamics</i>	Struktur tubuh dan sirip dada mendukung efisiensi propulsi dan pengurangan hambatan air.
5	Liu et al. (2022)	Eksperimental robotik	Sirip robot pari manta berbahan lunak	Pengembangan robot biomimetik	Material lunak menyerupai kartilago meningkatkan fleksibilitas dan performa locomotion.
6	Cao et al. (2026)	Eksperimental biomekanika	Pengaruh bentuk lengkung sirip dada	Simulasi gerak UUV biomimetik	Morfologi lengkung sirip memengaruhi kemampuan meluncur dan efisiensi gerakan.
7	Lassauce et al. (2025)	Penelitian lapangan	Ekologi spasial dan perilaku vertikal pari manta	Telemetry satelit	Pari manta menunjukkan pola gerakan vertikal adaptif terhadap kondisi oseanografi.
8	Chaumel et al. (2025)	Eksperimental biomekanika	Fungsi ekor pada kelompok pari	Analisis stabilitas gerakan	Ekor berperan penting dalam menjaga stabilitas dan arah gerakan tubuh.
9	Bucair et al. (2021)	Observasional lapangan	Tren kemunculan dan perilaku pari manta	Observasi perilaku	Aktivitas dan pola gerak pari manta di pengaruhi kondisi lingkungan dan aktivitas biologis.
10	Nicholson Jack et al. (2021)	Observasional ekologi	Interaksi pari manta dengan organisme lain	Pengamatan ekologis	Interaksi ekologis mempengaruhi pola perilaku dan pergerakan pari manta di habitat laut.

Sumber: Olahan Penulis (2026)

3.2. Pembahasan

3.2.1 Karakteristik dan Struktur Sistem Rangka Tulang Rawan pada Pari Manta (*Mobula birostris*)

Ikan pari manta (*Mobula birostris*) merupakan salah satu spesies ikan kartilaginosa terbesar yang termasuk dalam kelompok *Myliobatidae*. Spesies ini memiliki tubuh pipih dengan sirip dada yang melebar menyerupai sayap sehingga mendukung kemampuan berenang secara efisien di perairan terbuka. Morfologi tubuh pari manta menunjukkan adaptasi yang sangat baik terhadap lingkungan laut pelagis, terutama dalam aktivitas migrasi dan pencarian makanan. Beale et al. (2025) menjelaskan bahwa pari manta memiliki kemampuan penyelaman dalam yang berkaitan dengan pola perilaku dan adaptasi fisiologis terhadap kondisi oseanik. Karakteristik tubuh yang lebar dan ringan memungkinkan distribusi tekanan air berlangsung lebih stabil selama proses *locomotion*. Lassaue et al. (2024) juga menunjukkan bahwa perilaku vertikal pari manta berkaitan erat dengan kemampuan anatomi tubuh dalam menyesuaikan diri terhadap perubahan kedalaman perairan.



Gambar 2. Struktur ikan pari manta
Sumber: Lassaue et al. (2025)

Struktur rangka pari manta tersusun atas jaringan tulang rawan atau kartilago yang memiliki sifat fleksibel, ringan, dan elastis. Sistem kartilago tersebut berbeda dengan ikan *osteichthyes* yang memiliki tulang sejati berbasis mineral keras. Struktur kartilago pada pari manta memungkinkan tubuh bergerak lebih lentur sehingga mendukung kemampuan manuver dan stabilitas di lingkungan laut. Fleksibilitas tersebut menjadi salah satu faktor utama dalam menghasilkan gerakan renang yang efisien dengan konsumsi energi yang relatif rendah. (Liu et al. (2022) menjelaskan bahwa karakteristik material lunak yang meniru struktur tubuh pari manta mampu meningkatkan performa gerakan sirip dalam sistem robotik biomimetik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem kartilago pada pari manta memiliki kemampuan mekanik yang efektif dalam mendukung distribusi gaya gerak selama berenang.

Karakteristik fleksibilitas rangka pari manta berkaitan erat dengan struktur sirip dada yang mampu mengalami perubahan bentuk mengikuti tekanan fluida air. Struktur tersebut menghasilkan kemampuan gerak yang dinamis sehingga hambatan air dapat diminimalkan selama berenang. Cao et al. (2022) menyatakan bahwa optimasi postur gerak pari manta dipengaruhi oleh koordinasi bentuk tubuh dan fleksibilitas sirip dada dalam menghasilkan efisiensi hidrodinamika. Kajian Zhou et al. (2024) memperlihatkan bahwa bentuk tubuh pari manta mampu menciptakan distribusi tekanan fluida yang stabil ketika bergerak di permukaan maupun keluar dari air. Penelitian Li et al. (2025) juga menunjukkan bahwa struktur tubuh dan bentuk sirip pari manta memberikan performa hidrodinamik yang tinggi berdasarkan simulasi *computational fluid dynamics* (CFD). Karakteristik tersebut memperlihatkan

bahwa sistem kartilago pada pari manta berperan penting dalam menjaga keseimbangan antara fleksibilitas dan kekuatan mekanik tubuh.

Adaptasi anatomi pari manta terhadap lingkungan laut turut menjadi inspirasi dalam pengembangan teknologi biomimetik berbasis biomekanika organisme laut. Sistem rangka yang ringan dan fleksibel memungkinkan pari manta mempertahankan efisiensi energi selama melakukan migrasi dalam jarak jauh. Cao et al.(2026) menjelaskan bahwa bentuk lengkungan sirip dada memiliki pengaruh signifikan terhadap performa meluncur organisme menyerupai pari manta di lingkungan akuatik. Kajian Ye et al. (2026) juga menunjukkan bahwa struktur tubuh pari manta menjadi model penting dalam pengembangan robot laut dalam karena memiliki efisiensi gerakan dan stabilitas hidrodinamika yang tinggi. Hasil sintesis literatur memperlihatkan bahwa keunikan struktur rangka tulang rawan pada pari manta tidak hanya mendukung kemampuan *locomotion*, tetapi juga menunjukkan bentuk adaptasi evolusioner yang efektif terhadap kondisi lingkungan laut terbuka.

3.2.2 Peran Sistem Tulang Rawan dalam Mendukung Pola Pergerakan Pari Manta

Sistem rangka tulang rawan pada ikan pari manta (*Mobula birostris*) memiliki peran penting dalam menunjang kemampuan berenang secara efisien di lingkungan laut terbuka. Struktur kartilago yang ringan dan fleksibel memungkinkan tubuh pari manta menghasilkan gerakan yang stabil dengan penggunaan energi yang lebih rendah dibandingkan organisme laut bertulang keras. Karakteristik tersebut mendukung pola *locomotion* berupa gerakan meluncur dan mengepak yang menjadi ciri utama kelompok *Myliobatidae*. Weinheimer, (2021) menjelaskan bahwa kelompok pari elang dan pari manta memiliki adaptasi tubuh berbentuk pipih dengan sirip dada yang melebar menyerupai sayap sehingga menghasilkan kemampuan berenang yang efisien dan manuver yang baik di kolom perairan. Struktur tubuh tersebut juga berperan dalam menjaga keseimbangan dan stabilitas selama melakukan migrasi maupun aktivitas mencari makan.

Gerakan sirip dada pada pari manta bekerja melalui mekanisme undulasi yang memanfaatkan fleksibilitas sistem kartilago untuk menghasilkan dorongan hidrodinamik secara kontinu. Fleksibilitas tulang rawan memungkinkan distribusi tekanan air berlangsung lebih merata sehingga hambatan air dapat diminimalkan selama proses berenang. DeLaurier (2022) menyatakan bahwa perkembangan struktur rangka pada ikan berhubungan erat dengan kemampuan adaptasi gerakan dan efisiensi mekanik tubuh di lingkungan akuatik. Struktur kartilago pada pari manta juga memungkinkan perubahan bentuk tubuh secara dinamis mengikuti tekanan fluida air sehingga gerakan berenang menjadi lebih stabil dan adaptif. Kajian biomekanika menunjukkan bahwa kombinasi antara fleksibilitas rangka dan koordinasi sirip dada menghasilkan kemampuan *locomotion* yang efisien dalam mendukung aktivitas ekologis pari manta.

Karakteristik biomekanik sistem tulang rawan turut dipengaruhi oleh komposisi jaringan penyusun kartilago yang mengandung senyawa glikosaminoglikan dan komponen elastis lainnya. Riyanto et al.(2013) menjelaskan bahwa jaringan tulang rawan ikan pari memiliki kandungan glikosaminoglikan yang berfungsi menjaga elastisitas dan kekuatan struktur kartilago. Struktur tersebut memberikan kemampuan deformasi yang baik ketika tubuh menerima tekanan hidrodinamika selama berenang. Kondisi tersebut menjadikan sistem kartilago pada pari manta mampu berfungsi sebagai penopang sekaligus pengendali fleksibilitas gerak tubuh.(Hutajulu et al. 2025) juga menjelaskan bahwa ikan kartilaginosa memiliki sistem rangka yang lebih ringan dibandingkan ikan *osteichthyes* sehingga mendukung efisiensi gerak dan kemampuan adaptasi terhadap lingkungan laut yang dinamis.

Stabilitas gerakan pari manta tidak hanya dipengaruhi oleh sirip dada, tetapi juga oleh koordinasi bagian ekor dan struktur tubuh lainnya dalam menjaga keseimbangan selama berenang. Chaumel et al.(2025) menyatakan bahwa struktur ekor pada kelompok pari berfungsi dalam pengendalian stabilitas tubuh serta membantu menjaga arah gerakan di dalam air. Kemampuan tersebut sangat penting bagi pari manta yang melakukan pergerakan jarak jauh dan navigasi di perairan terbuka. Penelitian Orrell et al. (2025) turut menunjukkan bahwa karakteristik anatomi dan biomekanika kelompok *Batoidea* memiliki hubungan erat dengan pola perilaku, mobilitas, dan adaptasi ekologis spesies pari. Hasil sintesis literatur memperlihatkan bahwa sistem tulang rawan pada pari manta tidak hanya berperan sebagai struktur

penopang tubuh, tetapi juga menjadi faktor utama dalam meningkatkan efisiensi hidrodinamika, fleksibilitas gerakan, serta kestabilan *locomotion* di lingkungan laut.

3.2.3 Analisis Biomekanika dan Sintesis Hasil Penelitian Terdahulu

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa sistem rangka tulang rawan pada ikan pari manta (*Mobula birostris*) memiliki keunggulan biomekanik yang mendukung efisiensi gerakan di lingkungan laut. Struktur kartilago yang ringan dan fleksibel memungkinkan distribusi gaya gerak berlangsung lebih stabil sehingga energi yang dibutuhkan selama berenang menjadi lebih rendah. Kemampuan tersebut sangat penting bagi pari manta yang melakukan migrasi dan aktivitas pencarian makan dalam wilayah perairan yang luas. Meyer, W., & Seegers, (2012) menjelaskan bahwa struktur jaringan tubuh pada kelompok *elasmobranch* memiliki karakteristik elastis yang mendukung perlindungan tubuh sekaligus efisiensi pergerakan di lingkungan akuatik. Kajian biomekanika memperlihatkan bahwa kombinasi antara fleksibilitas tubuh, bentuk sirip dada, dan karakteristik permukaan tubuh menghasilkan kemampuan hidrodinamika yang optimal. Adaptasi tersebut menjadi salah satu faktor utama yang mendukung kemampuan pari manta bergerak secara efisien pada berbagai kondisi oseanik.

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan adanya perkembangan metode analisis morfologi dan biomekanika dalam memahami karakteristik pergerakan pari manta. Ford, et al. (2023) menyatakan bahwa pendekatan morfologi komparatif modern memungkinkan analisis struktur anatomi organisme dilakukan secara lebih mendalam dan presisi. Kajian biomekanika berbasis bioinspirasi juga berkembang melalui pengembangan perangkat mekanik bawah air yang meniru fleksibilitas organisme laut. Kang et al. (2025) menjelaskan bahwa struktur lunak dan fleksibel pada organisme akuatik menjadi dasar pengembangan perangkat adhesif mekanik untuk lingkungan bawah laut. Penelitian mengenai perubahan warna tubuh pari manta juga memperlihatkan adanya hubungan antara respons fisiologis dan aktivitas perilaku selama pergerakan di lingkungan laut Ari(2014). Temuan tersebut menunjukkan bahwa sistem biomekanika pari manta tidak hanya dipengaruhi oleh struktur rangka, tetapi juga oleh integrasi fisiologi dan perilaku tubuh terhadap kondisi lingkungan.

Sintesis hasil penelitian terdahulu memperlihatkan bahwa kemampuan *locomotion* pari manta berkaitan erat dengan adaptasi ekologis dan perilaku spesies tersebut di habitat laut terbuka. Bucair et al. (2021) menunjukkan bahwa pola perilaku dan kemunculan pari manta di suatu wilayah dipengaruhi oleh kondisi oseanografi dan aktivitas biologis di lingkungan sekitarnya. Nicholson-Nicholson-Jack et al. (2021) menjelaskan bahwa interaksi pari manta dengan organisme lain di habitatnya turut memengaruhi pola gerak dan aktivitas ekologisnya. Kajian yang dipublikasikan oleh Bureau of Ocean Energy Management (2025) juga menegaskan pentingnya penelitian berbasis sains dalam memahami pola pergerakan pari manta sebagai dasar pengelolaan dan konservasi spesies laut. Hasil keseluruhan studi SLR menunjukkan bahwa sistem rangka tulang rawan pada pari manta memiliki fungsi multidimensional yang mencakup dukungan biomekanika, efisiensi energi, stabilitas gerak, serta adaptasi ekologis terhadap lingkungan laut yang dinamis.

4. KESIMPULAN

Sistem rangka tulang rawan pada ikan pari manta (*Mobula birostris*) memiliki karakteristik biomekanik yang unik dan berperan penting dalam mendukung pola pergerakan di lingkungan laut. Struktur kartilago yang ringan, fleksibel, dan elastis memungkinkan pari manta menghasilkan gerakan berenang yang efisien dengan hambatan air yang lebih rendah dibandingkan organisme bertulang keras. Fleksibilitas sirip dada serta kemampuan tubuh menyesuaikan tekanan hidrodinamika menjadikan pari manta mampu melakukan *locomotion* secara stabil, efisien, dan adaptif di perairan terbuka. Hasil sintesis berbagai penelitian menunjukkan bahwa sistem rangka tulang rawan tidak hanya berfungsi sebagai penopang tubuh, tetapi juga mendukung efisiensi energi, kemampuan migrasi, serta adaptasi ekologis pari manta terhadap lingkungan laut yang dinamis. Kajian biomekanika terhadap pari manta juga memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi biomimetik dan penelitian kelautan modern.

Penelitian lanjutan diperlukan untuk memperdalam kajian mengenai hubungan antara struktur kartilago, sistem otot, dan pola hidrodinamika pada pari manta menggunakan teknologi analisis

biomekanika yang lebih modern. Pengembangan penelitian berbasis simulasi digital, computational fluid dynamics (CFD), serta biomimetik robotik dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai efisiensi gerakan organisme laut kartilaginosa. Kajian mengenai perilaku migrasi dan adaptasi ekologis pari manta juga perlu diperluas sebagai dasar penguatan strategi konservasi spesies di habitat alaminya. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi akademis dalam bidang biomekanika laut, biologi perikanan, serta pengembangan teknologi bawah laut berbasis inspirasi biologis.

DAFTAR PUSTAKA

- Ari, C. (2014). Rapid coloration changes of manta rays (Mobulidae). *Biological Journal of the Linnean Society*, 113(1), 180–193. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/bij.12321>
- Beale, C. S., Runtuboy, F., Sianipar, A. B., Beer, A. J. E., Kadarusman, Erdmann, M. V., Setyawan, E., Green, L., Duffy, C. A. J., Andrzejczek, S., Block, B. A., Forsberg, K., Meekan, M., & Gleiss, A. C. (2025). Deep diving behaviour in oceanic manta rays and its potential function. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1630451. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1630451>
- Bucair, N., Venables, S. K., Balboni, A. P., & Germanov, E. S. (2021). Sightings trends and behaviour of manta rays in Fernando de Noronha Archipelago, Brazil. *Marine Biodiversity Records*, 14, 10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s41200-021-00204-w>
- Cao, Y., Bao, T., Cao, Y., Wang, P., Yang, O., Lu, Y., & Cao, Y. (2022). Effects of Bionic Bone Flexibility on the Hydrodynamics of Pectoral Fins. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 981. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmse10070981>
- Cao, Y., Cao, Y., Ma, S., Li, X., Qu, Y., & Cao, Y. (2023). Realization and Online Optimization for Gliding and Flapping Propulsion of a Manta Ray Robot. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2173. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmse11112173>
- Cao, Y., Lei, X., Xing, C., Zhang, M., Wu, X., & Pan, G. (2026). The Influence of Pectoral Fin Bending Morphology on the Gliding Performance of Manta Ray-like UUVs. *Journal of Marine Science and Engineering*, 14(5), 406. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmse14050406>
- Cao, Y., Ma, S., Cao, Y., Pan, G., Huang, Q., & Cao, Y. (2022). Similarity Evaluation Rule and Motion Posture Optimization for a Manta Ray Robot. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 908. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmse10070908>
- Chaumel, J., White, C., & Lauder, G. (2025). Function of the tail in myliobatid rays: Role in controlling body stability. *Royal Society Open Science*, 12(11), 251269. <https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rsos.251269>
- Cortés Torres, E. d. J., García Gonzales, L. E., Villamizar Marin, L. E., & García Cena, C. E. (2024). Mechanical Design of a New Hybrid 3R-DoF Bioinspired Robotic Fin Based on Kinematics Modeling and Analysis. *Actuators*, 13(9), 353. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/act13090353>
- DeLaurier, A. (2022). Evolution and development of the fish jaw skeleton. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Developmental Biology*, 8(2), e337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wdev.337>
- Ford, K. L., Albert, J. S., Summers, A. P., Hedrick, B. P., Schachner, E. R., Jones, A. S., Evans, K., & Chakrabarty, P. (2023). A new era of morphological investigations: Reviewing methods for comparative anatomical studies. *Integrative Organismal Biology*, 5(1), obad008. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/iob/obad008>
- Hutajulu, H., Ekawati, N., Apriyanto, Novianti, T., Natsir, I., Wahyurini, E. T., & Mahmudin, T. (2025). Pengantar ilmu perikanan (A. Novendra & Gusmalia, Eds.). *CV. Pustaka Inspirasi Minang*.
- Kang, Z., Gomez, J. A., Ross, A. M., & Patel, N. (2025). Mechanical underwater adhesive devices for soft substrates. *Nature*, 643, 1271–1280. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41586-025-09304-4>
- Lassauce, H., Chateau, O., & Wantiez, L. (2026). Spatial Ecology of the Population of Reef Manta Rays (Mobula alfredi) in New Caledonia Using Satellite Telemetry 2—Vertical Behaviour. *Fishes*,

- 10(11), 545. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fishes10110545>
- Li, W., Ni, K., Li, C., Nan, C., & Su, S. (2025). Research on the Hydrodynamic Performance of Manta Rays Using a 2D CFD Model. *Biomimetics*, 10(6), 348. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/biomimetics10060348>
- Liu, Q., Chen, H., Wang, Z., He, Q., Chen, L., Li, W., Li, R., & Cui, W. (2022). A Manta Ray Robot with Soft Material Based Flapping Wing <https://doi.org/10.3390/jmse10070962>. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 962. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmse10070962>
- Ma, Y., Huang, Q., Pan, G., & Gao, P. (2022). Investigation of the Hydrodynamic Characteristics of Two Manta Rays Tandem Gliding. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9), 1186. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmse10091186>
- Meyer, W., & Seegers, U. (2012). Basics of skin structure and function in elasmobranchs: A review. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2011.03207.x>. In *Journal of Fish Biology* (Vol. 80). <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2011.03207.x>
- Nicholson-Jack, A. E., Harris, J. L., Ballard, K., Turner, K. M. E., & Stevens, G. M. W. (2021). A hitchhiker guide to manta rays: Patterns of association between *Mobula alfredi*, *M. birostris*, their symbionts, and other fishes in the Maldives. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253704>. *PLoS ONE*, 16(7), e0253704. <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253704>
- Orrell, D. L., Andrzejczek, S., Armstrong, A. O., & others. (2025). Current methods and best practice recommendations for skate and ray (Batoidea) research: Capture, handling, anaesthesia, euthanasia, and tag attachment. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 35, 117–144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11160-024-09918-3>
- Riyanto, B., Nurhayati, T., & Pujiastuti, A. D. (2013). Karakterisasi glikosaminoglikan dari tulang rawan ikan pari air laut (*Neotrygon kuhlii*) dan pari air tawar (*Himantura signifer*). *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 16(3), 224234.
- Root, Z. D., Gould, C., Brewer, M., Jandzik, D., & Medeiros, D. M. (2021). Comparative Approaches in Vertebrate Cartilage Histogenesis and Regulation: Insights from Lampreys and Hagfishes. *Diversity*, 13(9), 435. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/d13090435>
- Setyawan, E., Heinrichs, S., & Erdmann, M. (2024). First Documented Courtship Behavior between *Mobula birostris* and *M. alfredi* at a Coral Reef Cleaning Station in Misool, Raja Ampat. *Diversity*, 16(6), 319. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/d16060319>
- Weinheimer, J. M. (2021). *Myliobatidae*. <https://doi.org/https://animaldiversity.org/accounts/Myliobatidae/>
- Ye, L., Liu, H., Ding, Q., Hu, Z., Li, W., Cui, W., & Fan, D. (2026). Deep-Sea Biomimetic Manta Ray Robots: A Comprehensive Review Based on Operational Depth Spectrum, Structures, Energy Optimization, and Control Systems. *Biomimetics*, 11(3), 216. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/biomimetics11030216>
- Zhou, D.-H., Zhang, M.-H., Wu, X.-Y., Pei, Y., Liu, X.-J., Xing, C., Cao, Y., Cao, Y.-H., & Pan, G. (2024). Numerical Study on the Hydrodynamics of Manta Rays Exiting Water. <https://doi.org/10.3390/jmse12122125>. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(12), 2125. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmse12122125>