



Adaptasi Struktur Histologi Insang Ikan pada Berbagai Kondisi Lingkungan: Kajian Literatur

Bismi Rahma Firna¹, Sandi Fransisco Pratama^{2*}

¹Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

²Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

* Email: sfpratama@fmipa.unp.ac.id

DOI : 10.30605/biogenerasi.v11i1.8177

Accepted : 1 februari 2026 Approved : 22 februari 2026 Published : 23 Februari 2026

Abstract

Gills are vital organs in fish that function in respiration, osmoregulation, and ionic balance, making them highly sensitive to variations in environmental habitat conditions. Differences in water characteristics, such as water quality, dissolved oxygen, temperature, pH, and pollution levels, affect the structure and histological condition of the gills. This article aims to critically review and synthesize the structure and histological adaptations of fish gills in response to differences in habitat conditions through a literature review approach of reputable national and international publications. The results of the synthesis indicate that variations in environmental conditions trigger distinctive histological changes, including epithelial hyperplasia and hypertrophy, increased mucus and chloride cells, secondary lamella fusion, edema, and changes in vascularization, which reflect physiological adaptation mechanisms as well as early indicators of structural disorders due to environmental stress. Thus, the histological characteristics of fish gills have high potential to be used as biological biomarkers in assessing the quality of aquatic habitats and the health of aquatic ecosystems, as well as as a basis for the development of sustainable environmental biomonitoring.

Keywords : *Gill Histology; Gill Adaptation; habitat conditions*

PENDAHULUAN

Ikan adalah organisme akuatik yang seluruh siklus hidupnya sangat bergantung pada kondisi lingkungan perairan tempat mereka hidup (Pane *et al.*, 2023). Umumnya, ikan dapat diklasifikasikan berdasarkan tipe habitat ke dalam tiga kelompok utama yang memiliki mekanisme osmoregulasi yang berbeda, yaitu teleostei potadrom yang hidup di perairan tawar, teleostei oseanodrom yang menghuni perairan laut, serta teleostei diadrom atau euryhaline yang mampu bermigrasi dan beradaptasi terhadap perubahan salinitas antara perairan tawar dan laut (Merta & Kusmiyati, 2025).

Ikan memiliki bagian yang paling penting dalam sistem respirasi yaitu insang. Insang merupakan organ fisiologis utama yang memiliki peran pertukaran gas, osmoregulasi, dan pengaturan keseimbangan ionik tubuh. Permukaannya yang luas dan kontak langsung dengan lingkungan perairan, menjadikan jaringan insang sangat responsif terhadap perubahan kondisi fisik dan kimia air, sehingga sering digunakan sebagai indikator awal gangguan lingkungan (Shahid *et al.*, 2022).

Secara evolusioner, insang merupakan organ pertukaran gas pertama yang berkembang pada tulang belakang dan tersusun atas jaringan vaskular yang sangat kompleks, dilapisi oleh epitel dengan luas permukaan besar yang membentuk penghalang tipis antara sistem peredaran darah ikan dan lingkungan perairan (Evans *et al.*, 2005).

Struktur insang ikan tersusun lengkung insang (arcus branchialis), filamen insang (lamella primer), dan lamela sekunder yang dilapisi oleh epitel tipis serta didukung jaringan pembuluh darah yang kaya kapiler. Struktur ini memungkinkan terjadinya pertukaran gas secara efisien karena luas permukaan yang besar dan jarak difusi yang pendek. (Alsafy *et al.*, 2025). Variasi anatomi dan histologi insang mencerminkan bentuk adaptasi ekologis ikan terhadap karakteristik lingkungan perairan tertentu, yang ditunjukkan melalui perbedaan distribusi sel mukus, sel klorida, serta pola vaskularisasi, dan berperan penting dalam menunjang fungsi fisiologis adaptif ikan (Alsafy *et al.*, 2025).

Karakteristik struktural tersebut sangat berkaitan dengan kondisi fisika dan kimia perairan. Perubahan kualitas air, seperti

fluktuasi oksigen terlarut, pH (Haddeland *et al.*, 2021), suhu (Fidela *et al.*, 2024), dan peningkatan konsentrasi amonia (Atifah & Harahap, 2019). Tekanan lingkungan yang berlangsung terus-menerus dapat memicu perubahan histologis berupa edema dan nekrosis pada jaringan insang, yang menunjukkan terjadinya gangguan pada fungsi respirasi ikan (Atifah & Harahap, 2019). Adaptasi ini melibatkan perubahan morfologi dan histologi lamela insang sebagai mekanisme kompensasi untuk mempertahankan efisiensi pernapasan dan keseimbangan fisiologis.

Meskipun berbagai studi telah melaporkan perubahan histologis insang ikan air tawar akibat faktor lingkungan tertentu, belum banyak kajian yang secara komprehensif mengintegrasikan temuan-temuan tersebut untuk mengidentifikasi pola adaptasi histologis yang konsisten di berbagai kondisi perairan. Keterbatasan ini menyulitkan pemanfaatan indikator histologis insang sebagai dasar biomonitoring perairan tawar yang bersifat komparatif dan aplikatif.

Berdasarkan hal tersebut, artikel ini disusun sebagai review literatur yang bertujuan untuk mensintesis dan menganalisis secara kritis struktur serta adaptasi histologis insang ikan air tawar sebagai respons terhadap berbagai kondisi lingkungan perairan.

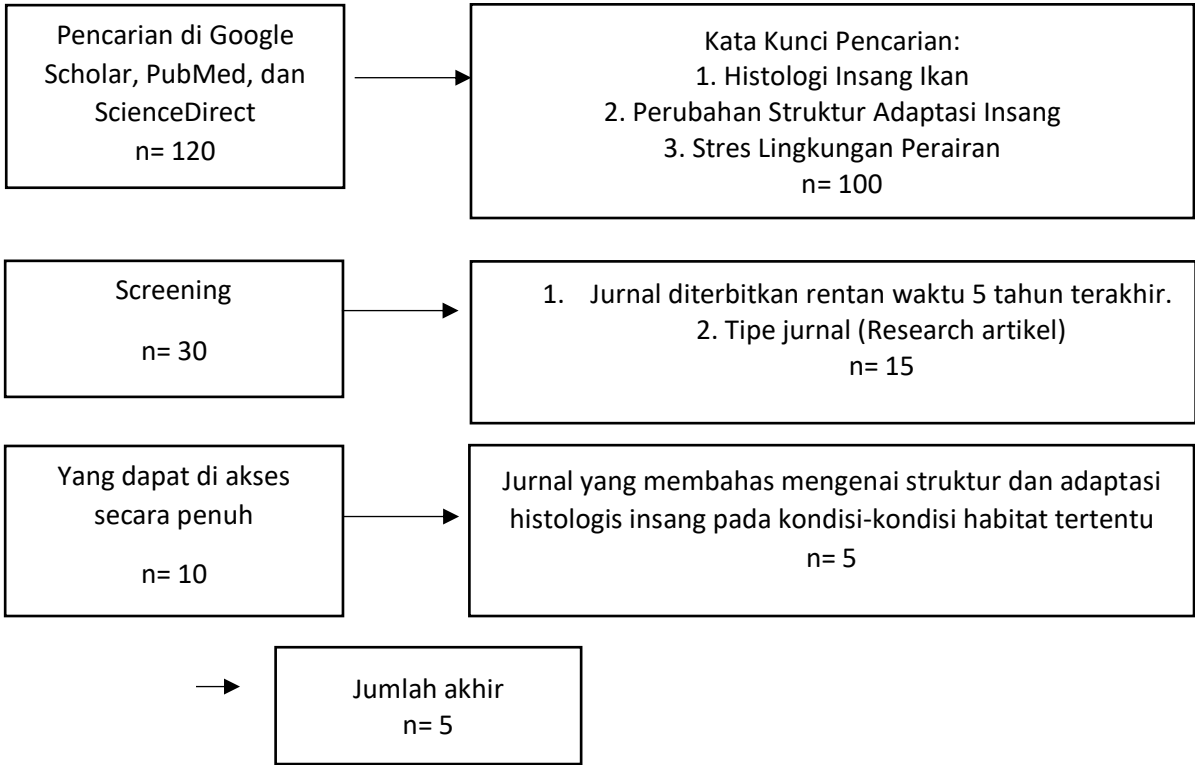
METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan literature review yang dilakukan melalui proses identifikasi, evaluasi, serta interpretasi terhadap hasil penelitian yang berkaitan dengan topik atau fenomena yang diteliti.

Proses pengumpulan literatur dalam studi ini mengikuti panduan *Preferred Reporting Items For Systematic Review and Meta-Analysis (PRISMA)*. Tahap ini terdiri dari 4 prosedur yaitu, identifikasi, skrining, kelayakan, dan penerimaan. Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan pustaka untuk mengkaji struktur dan adaptasi histologis insang ikan terhadap berbagai kondisi habitat lingkungan. Pencarian pustaka dilakukan melalui basis data ilmiah terkemuka, yaitu Google Scholar, PubMed, dan ScienceDirect dengan kata kunci pencarian. Artikel yang ditinjau dibatasi pada

publikasi dari lima tahun terakhir, yaitu periode 2020 – 2025. Kriteria inklusi meliputi artikel penelitian primer dan ulasan yang membahas histologi insang ikan dan tersedia dalam bentuk teks lengkap. Seleksi pustaka dilakukan secara bertahap melalui penyaringan judul dan abstrak,

diikuti dengan tinjauan teks lengkap. Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif dan kualitatif dengan mengelompokkan temuan berdasarkan kondisi habitat lingkungan dan jenis perubahan histologis insang.



Gambar 1. Diagram alir PRISMA

HASIL PENELITIAN

Hasil telaah literatur menunjukkan bahwa struktur dan fungsi histologis insang ikan sangat dipengaruhi oleh variasi kondisi lingkungan perairan. Peningkatan suhu air, pH rendah, kadar oksigen terlarut yang rendah, serta tingginya kekeruhan perairan menyebabkan perubahan morfologi dan histologi insang, seperti stres fisiologis, gangguan fungsi respirasi, dan penurunan toleransi hipoksia. Respons tersebut ditemukan pada berbagai spesies ikan air tawar maupun laut, termasuk *Lates calcarifer*, *Larimichthys crocea*, *Paralichthys olivaceus*, *Ammocrypta pellucida*, dan *Cyprinus carpio*. Secara umum, perubahan histologis insang mencerminkan mekanisme adaptasi ikan dalam mempertahankan fungsi fisiologisnya terhadap tekanan lingkungan yang berbeda-beda.

Untuk memperjelas pemahaman serta mempermudah perbandingan hasil kajian, ringkasan penelitian dari berbagai spesies ikan yang mengalami adaptasi struktur histologis pada berbagai macam kondisi habitat lingkungan disajikan dalam bentuk tabel (Tabel 1).

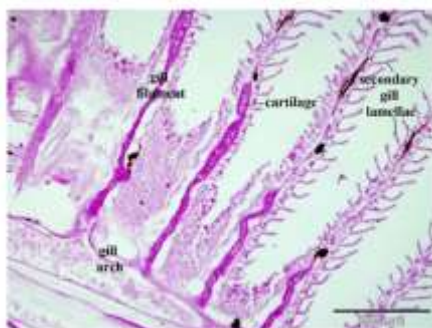
Tabel 1. Ringkasan penelitian histologi insang di berbagai kondisi lingkungan habitat.

No	Judul Artikel	Penulis	Spesies Ikan	Habitat	Kondisi Lingkungan
					n

1.	Effect of increasing water temperature on the physiology and gill histology of Barramundi, <i>Lates calcarifer</i> (Pisces, Perciformes) fingerlings	(Amir <i>et al.</i> , 2022)	Kakap Putih (<i>lates calcarifer</i>)	Perairan Air Tawar	Suhu Air Tinggi
2.	Insight into critical water quality factors and gill function of large yellow croaker (<i>Larimichthys crocea</i>) during packaging bag transport	(Sun <i>et al.</i> , 2024)	Croaker Kuning Besar (<i>Larimichthys crocea</i>)	Perairan Laut Pesisir Dan Estuari	pH Air Rendah
3.	Acute Hypoxia Stress-Induced Apoptosis in Gill of Japanese Flounder (<i>Paralichthys olivaceus</i>) by Modulating the Epas1/Bad Pathway	(Li <i>et al.</i> , 2022)	Ikan Flounder Jepang (<i>Paralichthys olivaceus</i>)	Habitat Perairan Laut (Marine)	Kadar Oksigen Terlarut Rendah
4.	Impact of turbidity on the gill morphology and hypoxia tolerance of eastern sand darter (<i>Ammocrypta pellucida</i>)	(Firth <i>et al.</i> , 2024)	ikan sand darter timur (<i>Ammocrypta pellucida</i>)	Perairan Air Tawar	Tingkat Kekeruhan Air yang Tinggi
5.	Seasonal Histomorphological Study of the Gills of Common Carp (<i>Cyprinus carpio</i>) in the Tigris River, Iraq	(Al-Taai, 2025)	ikan mas (<i>Cyprinus carpio</i>)	Perairan Air Tawar	Perubahan Suhu yang Ekstrem antar musim

Berdasarkan telaah terhadap berbagai artikel ilmiah yang membahas histologi insang ikan pada beragam kondisi habitat, diperoleh gambaran bahwa struktur insang bersifat plastis dan menunjukkan respons adaptif yang berbeda terhadap perubahan faktor lingkungan. Faktor-faktor utama yang memengaruhi struktur dan histologi insang meliputi kekeruhan perairan, kadar oksigen terlarut (DO) (Li *et al.*, 2022), suhu (Amir *et al.*, 2022), pH (Sun *et al.*, 2024), salinitas (Mariu *et al.*, 2023) . Respons yang muncul umumnya berupa perubahan morfologi lamela, epitel insang, serta komposisi dan distribusi sel-sel penyusunnya.

Berdasarkan berbagai literatur, insang ikan pada kondisi lingkungan yang stabil dan optimal tersusun atas arkus insang, lamela primer, dan lamela sekunder yang berkembang baik (Alsafy *et al.*, 2025). Lamela sekunder tersusun sejajar dengan epitel tipis yang didominasi oleh sel pavement, sel pilar, dan sejumlah sel ionosit. Struktur ini memungkinkan proses pertukaran gas berlangsung secara efisien serta mendukung fungsi osmoregulasi dan keseimbangan ion tubuh ikan.

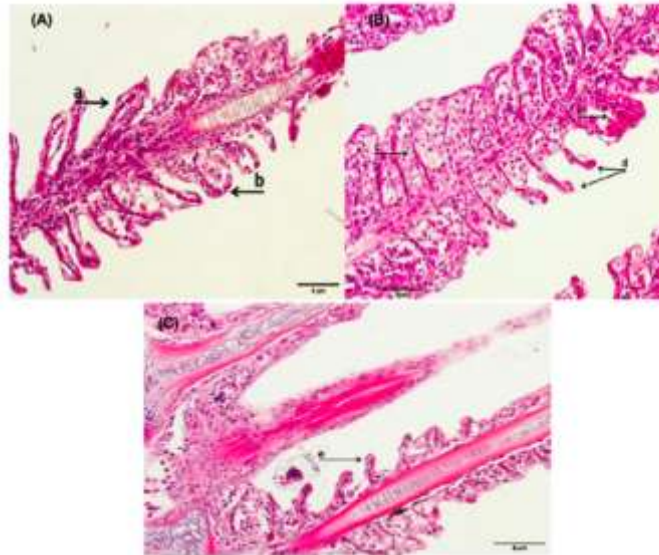


Gambar 1. Struktur Umum Histologi Insang teleostei dalam Kondisi Normal (Alsafy *et al.*, 2025)

Adaptasi Struktur Histologis Insang Terhadap Suhu

Peningkatan suhu air sebagai salah satu perubahan utama kondisi habitat perairan terbukti memberikan dampak nyata terhadap struktur histologis dan fungsi fisiologis insang ikan (Cintia *et al.*, 2023a). Stres suhu

diketahui berdampak langsung pada organ insang, yang ditunjukkan melalui perubahan struktur histologis dan penurunan efisiensi respirasi pada berbagai spesies ikan (Ah Al-Taai & Khalaf, 2024). Studi Amir et al. (2022) menunjukkan bahwa meskipun benih kakap putih mampu bertahan hidup pada rentang suhu 28–35 °C, peningkatan suhu di atas kisaran optimum (≥ 31 °C) memicu stres fisiologis intens yang diikuti oleh perubahan histopatologis pada jaringan insang. Secara histologis, insang menunjukkan hipertrofi dan hiperplasia sel epitel, fusi lamela sekunder, telangiektasis, serta pemendekan lamela sekunder, dengan tingkat keparahan yang meningkat seiring kenaikan suhu. (Gambar 2).



Gambar 2. Kelainan insang akibat paparan suhu. (A) Insang menunjukkan fusi lamela dan hipertrofia, (B) Hiperplasia, (C) Insang menunjukkan kelainan telangiektasis.

Variasi suhu perairan secara langsung memengaruhi keseimbangan antara kebutuhan metabolik dan kapasitas respirasi ikan (Sáez-Arteaga *et al.*, 2024). Peningkatan suhu menyebabkan laju metabolisme dan konsumsi oksigen meningkat secara eksponensial, sehingga insang harus menyesuaikan struktur untuk mempertahankan efisiensi difusi oksigen. Perubahan kondisi histologis terhadap insang akibat perubahan suhu yang ekstrem juga ditemukan oleh (Al-Taai, 2025) penelitian pada ikan mas (*Cyprinus carpio*) yang hidup di habitat perairan sungai tawar dataran rendah, khususnya Sungai Tigris di wilayah Taji, Baghdad, menunjukkan bahwa fluktuasi suhu musiman berpengaruh signifikan terhadap morfologi dan histologi insang. Habitat tersebut dicirikan oleh perairan mengalir dengan suhu air yang berfluktuasi secara ekstrem antar musim, yakni sekitar 8 °C pada musim dingin dan meningkat hingga 31 °C pada musim panas, sementara suhu optimal adaptasi fisiologis ikan mas berada pada kisaran 23–30°C.

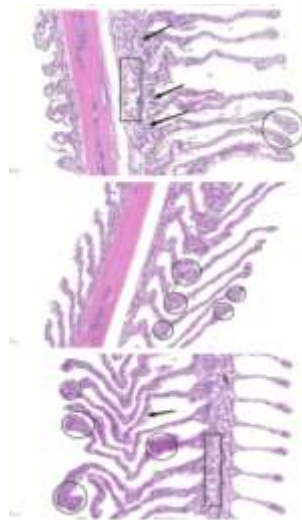


Gambar 3. Pembengkokan Ujung Filamen (Panah Biru) dan Lamela (Panah Hitam). (Al-Taai, 2025)

Adaptasi Struktur Histologis Insang Terhadap pH

Perairan dengan pH rendah diketahui merupakan salah satu stresor kimia utama yang berdampak langsung pada struktur dan fungsi insang ikan (Evans *et al.*, 2005). Secara umum, kisaran pH optimal bagi sebagian besar ikan air tawar berada pada rentang 6,5–8,5 (Mariu *et al.*, 2023b). Nilai di bawah atau di atas

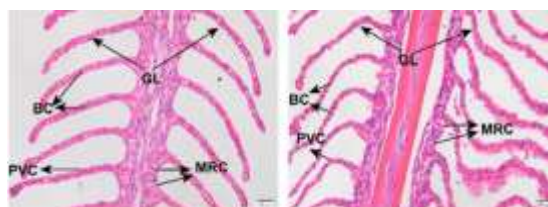
kisaran tersebut dapat menurunkan performa fisiologis dan meningkatkan risiko kematian terutama pada fase larva dan juvenil yang lebih sensitif terhadap fluktuasi kimia air. Hasil telaah literatur menunjukkan bahwa kondisi asam dapat mengganggu keseimbangan ion dan meningkatkan permeabilitas epitel insang, sehingga memicu respons adaptif berupa perubahan struktur histologis. Dilaporkan Pada ikan Croaker Kuning Besar (*Larimichthys crocea*) di perairan laut pesisir china (Sun *et al.*, 2024) yang mengalami kondisi habitat dengan pH yang rendah terjadi modifikasi dan adaptasi pada struktur histologi insangnya. Dimana, Terlihat pada lamela primer dan lamela sekunder, yang ditandai dengan pembengkakan jaringan epitel dan pelebaran ruang antar sel. Selain itu, tampak detasemen epitel respirasi dari jaringan penunjang, yang menunjukkan gangguan integritas barier epitel insang.



Gambar 4. struktur histologis insang menunjukkan perubahan patologis yang jelas dan konsisten dengan kondisi stres lingkungan.
(Sun *et al.*, 2024)

Adaptasi Struktur Histologis Insang Terhadap Kadar Oksigen Terlarut (DO)

Penurunan kadar oksigen terlarut (hipoksia) merupakan salah satu stresor lingkungan paling signifikan bagi ikan karena secara langsung membatasi proses respirasi aerobik (Sollid *et al.*, 2003). Literatur menunjukkan bahwa hipoksia menyebabkan peningkatan kebutuhan efisiensi difusi oksigen, sehingga insang mengalami perubahan morfologis yang bertujuan memperluas luas permukaan respirasi dan memperpendek jarak difusi. Adaptasi ini ditemukan pada ikan Flounder Jepang (*Paralichthys olivaceus*) yang hidup atau terpapar pada habitat dengan DO rendah. Dimana keadaan itu menunjukkan respons adaptif yang jelas pada tingkat jaringan insang.

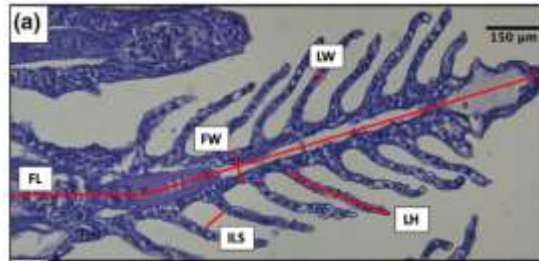


Gambar 5. Insang yang mengalami hipoksia.; BC: sel darah; PVC: sel penutup; MRC: mitokondria lamela insang; BC: sel darah; PVC: sel penutup; MRC: sel kaya mitokondria; ILCM: interlamellar sel kaya; ILCM: massa sel interlamellar. massa sel.
(Li *et al.*, 2022)

Hipoksia memicu perubahan morfologi berupa penurunan volume *interlamellar cell mass* dan pemanjangan lamela sekunder, yang secara fungsional meningkatkan luas permukaan respirasi dan efisiensi difusi oksigen dari lingkungan perairan ke dalam darah.

Adaptasi Struktur Histologis Insang Terhadap Kekeruhan Air

Kekeruhan air yang tinggi akibat peningkatan partikel tersuspensi dan sedimen halus merupakan salah satu stresor fisik yang dapat memengaruhi struktur dan fungsi insang ikan (Cintia *et al.*, 2023). Dilaporkan oleh (Firth *et al.*, 2024) bahwa pada ikan benthik yang hidup pada perairan dengan tingkat kekeruhan sedang hingga tinggi ($\pm 8-94$ NTU), seperti pada Sungai Thames dibandingkan Sungai Grand di Kanada, mengalami perubahan adaptif terbatas pada struktur histologis insang.



Gambar 6. (FL), lebar filamen (FW), tinggi lamela (LH), lebar lamela (LW), dan jarak antar lamela (ILS). (Firth *et al.*, 2024)

Adaptasi histologis insang yang teramati meliputi peningkatan lebar filamen dan ruang interlamela, yang diduga berfungsi sebagai mekanisme protektif untuk mengurangi abrasi dan penyumbatan lamela oleh partikel tersuspensi. Namun, perubahan tersebut relatif minimal dan tidak disertai peningkatan signifikan pada patologi insang seperti fusi lamela, hiperplasia, atau peningkatan jumlah ionosit, menunjukkan bahwa tingkat kekeruhan yang diuji belum melampaui ambang toleransi struktural jaringan insang.

Pembahasan

Insang merupakan organ multifungsi yang memiliki peran sentral dalam respirasi, osmoregulasi, regulasi asam-basa, serta ekskresi nitrogen pada ikan (Evans *et al.*, 2005). Struktur histologisnya yang tersusun atas filamen primer dan lamela sekunder dengan epitel tipis (Alsafy *et al.*, 2025) dan vaskularisasi tinggi menjadikan insang sangat efisien dalam pertukaran gas, namun sekaligus sangat rentan terhadap perubahan lingkungan. Hasil sintesis dari lima artikel yang direview menunjukkan bahwa berbagai stresor lingkungan baik fisik maupun kimia memicu pola respons histologis yang relatif konsisten, yaitu hiperplasia epitel, hipertrofi, peningkatan sel mukus dan ionosit, fusi lamela sekunder, edema, serta perubahan vaskularisasi. Pola ini menunjukkan bahwa insang memiliki plastisitas struktural yang tinggi sebagai bentuk mekanisme kompensasi terhadap tekanan lingkungan.

Pada peningkatan suhu perairan, perubahan histologis yang dilaporkan pada *Lates calcarifer* (Amir *et al.*, 2022) menunjukkan bahwa suhu di atas kisaran optimal memicu stres fisiologis yang ditandai dengan hiperplasia epitel, fusi lamela sekunder, dan telangiektasis. Secara fisiologis, peningkatan suhu meningkatkan laju

metabolisme dan kebutuhan oksigen, sehingga insang mengalami remodeling (Perubahan) untuk mempertahankan suplai oksigen. Namun, penebalan epitel dan fusi lamela justru meningkatkan jarak difusi oksigen dan berpotensi menurunkan efisiensi respirasi. Hal ini menunjukkan bahwa adaptasi struktural bersifat kompromis: protektif dalam jangka pendek tetapi dapat menurunkan fungsi apabila paparan berlangsung lama. Kondisi serupa juga ditemukan pada variasi suhu musiman ekstrem pada *Cyprinus carpio* (Al-Taai, 2025), yang memperlihatkan bahwa suhu rendah maupun tinggi di luar kisaran toleransi dapat mengubah dimensi lamela dan jarak interlamela, sehingga memengaruhi kapasitas pertukaran gas.

Pada kondisi pH rendah, perubahan histologis insang menunjukkan pola adaptasi yang berbeda namun tetap konsisten dalam prinsip perlindungan jaringan. Studi pada *Larimichthys crocea* (Sun *et al.*, 2024) melaporkan edema, detasemen epitel respirasi, dan penebalan lamela sekunder sebagai respons terhadap kondisi air yang lebih asam. Secara mekanistik, penebalan epitel dan peningkatan produksi mukus berfungsi membatasi penetrasi ion hidrogen dan zat toksik ke dalam sistem peredaran darah. Namun, peningkatan ketebalan epitel juga memperpanjang jarak difusi oksigen dan dapat mengganggu osmoregulasi. Hal ini menegaskan bahwa adaptasi insang terhadap pH rendah merupakan bentuk gill remodeling yang berorientasi protektif, tetapi tetap memiliki konsekuensi fisiologis terhadap efisiensi respirasi.

Pada kondisi hipoksia, respons adaptasi histologis lebih berfokus pada peningkatan luas permukaan respirasi. Penelitian pada *Paralichthys olivaceus* (Li *et al.*, 2022) menunjukkan bahwa hipoksia memicu pemanjangan lamela sekunder

dan reduksi massa sel interlamela (interlamellar cell mass), yang secara fungsional meningkatkan area difusi oksigen. Selain itu, peningkatan apoptosis sel insang dilaporkan berperan dalam proses remodeling untuk mengurangi hambatan difusi. Adaptasi ini menunjukkan mekanisme kompensasi langsung terhadap keterbatasan oksigen, berbeda dengan respons pada suhu tinggi atau pH rendah yang lebih menekankan proteksi jaringan. Dengan demikian, stres hipoksia memicu adaptasi yang lebih spesifik terhadap fungsi respirasi dibandingkan stres kimia.

Sementara itu, pada kondisi kekeruhan tinggi seperti pada *Ammocrypta pellucida* (Firth *et al.*, 2024), perubahan histologis relatif ringan dan lebih bersifat morfologis dibandingkan patologis. Peningkatan lebar filamen dan ruang interlamela diduga berfungsi mengurangi abrasi akibat partikel tersuspensi. Tidak ditemukannya fusi lamela atau nekrosis menunjukkan bahwa tingkat kekeruhan yang diuji masih berada dalam batas toleransi struktural. Namun demikian, penurunan toleransi hipoksia yang terukur menunjukkan adanya keterbatasan respons fungsional meskipun perubahan histologis tidak berat. Hal ini memperlihatkan bahwa tidak semua stresor menghasilkan perubahan patologis yang nyata, tetapi tetap dapat memengaruhi kapasitas fisiologis ikan.

Secara keseluruhan, hasil sintesis menunjukkan bahwa adaptasi histologis insang ikan mengikuti pola umum: respons awal bersifat protektif dan kompensatorik (hiperplasia, peningkatan mukus, remodeling lamela), sedangkan paparan kronis atau intensitas tinggi dapat beralih menjadi perubahan patologis (fusi lamela, edema berat, telangiectasis, nekrosis). Konsistensi pola ini pada berbagai spesies dan tipe habitat memperkuat peran insang sebagai biomarker biologis yang sensitif terhadap perubahan kualitas perairan. Dengan demikian, karakteristik histologis insang tidak hanya mencerminkan respons adaptasi fisiologis, tetapi juga dapat dimanfaatkan sebagai indikator dini degradasi habitat akuatik dalam konteks biomonitoring berkelanjutan.

SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil sintesis literatur, struktur histologis insang menunjukkan plastisitas yang tinggi dalam merespons perubahan kondisi fisika dan kimia perairan, seperti suhu, pH, hipoksia, dan kekeruhan. Respons yang muncul umumnya bersifat protektif dan kompensatorik, seperti hiperplasia, peningkatan mukus, serta remodeling

lamela untuk mempertahankan fungsi respirasi dan osmoregulasi. Namun, apabila stresor berlangsung dalam intensitas tinggi atau jangka panjang, perubahan tersebut dapat berkembang menjadi kondisi patologis yang menurunkan efisiensi pertukaran gas. Hal ini menegaskan bahwa insang merupakan biomarker yang sensitif dalam mendeteksi perubahan kualitas lingkungan perairan.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan analisis histologis dengan parameter kualitas air secara kuantitatif agar hubungan sebab-akibat antara stresor lingkungan dan respons jaringan dapat dijelaskan lebih komprehensif. Selain itu, diperlukan standarisasi metode preparasi dan penilaian histopatologi insang guna meningkatkan validitas perbandingan antarspesies dan antarhabitat dalam konteks biomonitoring perairan berkelanjutan.

DAFTAR RUJUKAN

- Ah Al-Taai, S., & Khalaf, T. K. (2024). Anatomical Study Of Male Accessory Genital Glands In Hare Lepus Americanus. In *International Journal Of Medical Science And Clinical Research* *Www.Journalofmedical.Com Online* (Vol. 6, Number 2). *Www.Journalofmedical.Com*
- Alsafy, M. A. M., Abd-Elhafeez, H. H., Rashwan, A. M., Erasha, A., Ali, S., & El-Gendy, S. A. A. (2025). Anatomy, Histology, And Morphology Of Fish Gills In Relation To Feeding Habits: A Comparative Review Of Marine And Freshwater Species. *BMC Zoology*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/S40850-025-00223-5>
- Al-Taai, S. A. H. (2025). Seasonal Histomorphological Study Of The Gills Of Common Carp (Cyprinus Carpio) In The Tigris River, Iraq. *Asian Journal Of Science And Applied Technology*, 14(1), 1–8. <https://doi.org/10.70112/Ajsat-2025.14.1.4256>
- Amir, F., Muchlisin, Z. A., Nur, F. M., Fadli, N., Siti-Azizah, M. N., Wilkes, M., Tang, U. M., Hasan, B., Batubara, A. S., Kocabas, F. K., & Marimuthu, K. (2022). Effect Of Increasing Water Temperature On The Physiology And Gill Histology Of Barramundi, Lates Calcarifer (Pisces, Perciformes) Fingerlings. *International Aquatic Research*, 14(4), 263–273.

- <https://doi.org/10.22034/IAR.2022.1965030.1318>
- Atifah, Y., & Harahap, F. S. (2019). Effect of Heavy Metal Spread on River Flows from Gold Mining Toward Water Biota in Batang Gadis Mandailing Natal River. *Budapest Int. Res. Exact Sci. J*, 2(1), 37-43.
- Atifah, Y., & Lubis, F. A. (2017). Keanekaragaman Jenis Ikan Di Sungai Batang Gadis Mandailing Natal Sumatera Utara. *Scripta Biologica*, 4(4), 215.
- Cintia, V., Syarif, A. F., & Robin, R. (2023). Pengaruh suhu terhadap kelangsungan hidup, pertumbuhan dan tingkat konsumsi oksigen ikan seluang (*Brevibora dorsiocellata*) di wadah budidaya pada tahap awal domestikasi. *Journal of Aquatropica Asia*, 8(1), 24-32.
- Evans, D. H., Piermarini, P. M., & Choe, K. P. (2005). *The Multifunctional Fish Gill: Dominant Site Of Gas Exchange, Osmoregulation, Acid-Base Regulation, And Excretion Of Nitrogenous Waste*. <https://doi.org/10.1152/Physrev.00050.2003>.-The
- Fidela, W., Febriani, A., Hamdani, A., Ramalia, A., Putri, D. D., Hasibuan, S. F., Pratama & Atifah, Y. (2024). Pengaruh Suhu Air Terhadap Buka-an Operkulum dan Metabolisme pada Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*). In *Prosiding Seminar Nasional Biologi* (Vol. 4, No. 1, pp. 757-766).
- Firth, B. L., Craig, P. M., Drake, D. A. R., & Power, M. (2024). Impact Of Turbidity On The Gill Morphology And Hypoxia Tolerance Of Eastern Sand Darter (*Ammocrypta Pellucida*). *Journal Of Fish Biology*, 104(6), 1888–1898.
- Haddeland, S., Lazado, C. C., Merkin, G. V., Myre, O. J., Okubamichael, M. A., Pedersen, L. F., & Pittman, K. (2021). Dynamic Morphometrics Of Mucous Cells Reveal The Minimal Impact Of Therapeutic Doses Of Peracetic Acid On Atlantic Salmon Gill Health. *Aquaculture*, 534.
- Haqqawiy, E. J., Aliza, D., & Budiman, H. (2013). Pengaruh kepadatan populasi terhadap gambaran patologi anatomi dan histopatologi insang ikan nila (*Oreochromis niloticus*). *Jurnal Medika Veterinaria*, 7(1).
- Li, G., Liu, B., Yang, J., Li, X., Wang, H., Wen, H., & He, F. (2022). Acute Hypoxia Stress-Induced Apoptosis In Gill Of Japanese Flounder (*Paralichthys Olivaceus*) By Modulating The Epas1/Bad Pathway. *Biology*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/Biology11111656>
- Mariu, A., Chatha, A. M. M., Naz, S., Khan, M. F., Safdar, W., & Ashraf, I. (2023). Effect Of Temperature, Ph, Salinity And Dissolved Oxygen On Fishes. *Journal Of Zoology And Systematics*, 1(2), 1–12. <https://doi.org/10.56946/Jzs.V1i2.198>
- Mariu, A., Chatha, A. M. M., Naz, S., Khan, M. F., Safdar, W., & Ashraf, I. (2023b). Effect Of Temperature, Ph, Salinity And Dissolved Oxygen On Fishes. *Journal Of Zoology And Systematics*, 1(2), 1–12. <https://doi.org/10.56946/Jzs.V1i2.198>
- Merta, I. W., & Kusmiyati, K. (2025). Comparison Of Physiological Adaptation And Osmoregulation Survival Of Goldfish (*Cyprinus Carpio*) And Nile Tilapia (*Oreochromis Niloticus*) After Exposure To Seawater. *Jurnal Biologi Tropis*, 25(2), 2277–2283. <https://doi.org/10.29303/Jbt.V25i2.9389>
- Pane, E. P., Arfiati, D., & Apriliyanti, F. J. (2023). Respon Fisiologis Ikan Terhadap Lingkungan Hidupnya. *Jurnal Aquatik*, 6(2), 71-83.
- Sáez-Arteaga, A., Viegas, I., Palma, M., Dantagnan, P., Valdebenito, I., Figueroa Villalobos, E., Hernández, A., Guerrero-Jiménez, J., Metón, I., & Heyser, C. (2024). Impact Of Increasing Temperatures On Neuroendocrine And Molecular Responses Of Skeletal Muscle And Liver In Fish: A Comprehensive Review. In *Aquaculture Reports* (Vol. 39). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/J.Aqrep.2024.102448>
- Shahid, S., Sultana, T., Sultana, S., Hussain, B., Al-Ghanim, K. A., Al-Bashir, F., Riaz, M. N., & Mahboob, S. (2022). Detecting Aquatic Pollution Using Histological Investigations Of The Gills, Liver, Kidney, And Muscles Of *Oreochromis Niloticus*. *Toxics*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/Toxics10100564>

Sollid, J., De Angelis, P., Gundersen, K., & Nilsson, G. E. (2003). Hypoxia Induces Adaptive And Reversible Gross Morphological Changes In Crucian Carp Gills. *Journal Of Experimental Biology*, 206(20), 3667–3673. <https://doi.org/10.1242/jeb.00594>

Sun, H., Gui, F., Feng, D., Wang, P., Qu, X., Niu, S., & Zhang, G. (2024). Insight Into Critical Water Quality Factors And Gill Function Of Large Yellow Croaker (*Larimichthys Crocea*) During Packaging Bag Transport. *Aquaculture Reports*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102330>