

POTENSI EKSTRAK TINTA GURITA SEBAGAI *QUORUM QUENCHING* UNTUK MENCEGAH PEMBENTUKAN BIOFILM *Edwardsiella tarda* PADA AKUAKULTUR (REVIEW)

Rangga Idris Affandi*, Bagus Dwi Hari Setyono

Program Studi Budidaya Perairan, Fakultas Pertanian, Universitas Mataram
Jalan Pendidikan No. 37 Mataram, Nusa Tenggara Barat
ranggaidrisaffandi@unram.ac.id

ABSTRACT

Edwardsiella tarda is a pathogenic bacterium that often causes disease in freshwater fish, thus impacting food insecurity and global economic losses. Biofilm formation by *E. tarda* regulated by the quorum sensing (QS) system plays an important role in increasing virulence and resistance to antibiotics. Inhibiting the QS system can be an option to control *E. tarda* infection in fish. One of the ingredients that can be used is octopus ink extract containing alkaloids. This study aims to analyze the potential of octopus ink extract as a quorum quenching (QQ) agent in preventing the formation of *E. tarda* biofilms in aquaculture. The method used is a systematic literature study by collecting data from scientific articles. The analysis was carried out in depth to evaluate the mechanism of octopus ink extract in inhibiting QS and bacterial biofilms. The results showed that active compounds in octopus ink, such as alkaloids, can inhibit communication between bacterial cells by blocking QS autoinducers. This process suppresses the expression of virulence genes and prevents biofilm formation without affecting bacterial viability, so the risk of antibiotic resistance can be minimized. In conclusion, octopus ink extract has great potential as a quorum quenching agent to support the management of *E. tarda* infection in aquaculture. The use of this extract is not only effective but also environmentally friendly, offering an innovative solution to improve the health of farmed fish and the sustainability of the aquaculture industry. Furthermore, octopus ink extract can be used as an immunostimulant in aquaculture industry.

Keywords: *Aquaculture, Biofilm, Edwardsiella tarda, Octopus Ink Extract, Quorum Quenching*

ABSTRAK

Edwardsiella tarda merupakan bakteri patogen yang sering menyebabkan penyakit pada ikan air tawar, sehingga berdampak pada keamanan pangan dan kerugian ekonomi global. Pembentukan biofilm oleh *E. tarda* yang diatur oleh sistem *quorum sensing* (QS) berperan penting dalam meningkatkan virulensi dan resistensi terhadap antibiotik. Menghambat sistem QS dapat menjadi salah satu pilihan untuk mengendalikan infeksi *E. tarda* pada ikan. Salah satu bahan yang dapat digunakan adalah ekstrak tinta gurita yang mengandung alkaloid. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi ekstrak tinta gurita sebagai agen *quorum quenching*

(QQ) dalam mencegah pembentukan biofilm *E. tarda* pada akuakultur. Metode yang digunakan adalah studi literatur sistematis dengan mengumpulkan data dari artikel ilmiah. Analisis dilakukan secara mendalam untuk mengevaluasi mekanisme ekstrak tinta gurita dalam menghambat QS dan pembentukan biofilm bakteri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa senyawa aktif dalam tinta gurita, seperti alkaloid, dapat menghambat komunikasi antar sel bakteri dengan cara memblokir autoinduser QS. Proses ini menekan ekspresi gen virulensi dan mencegah pembentukan biofilm tanpa memengaruhi viabilitas bakteri, sehingga risiko resistensi antibiotik dapat diminimalkan. Kesimpulannya, ekstrak tinta gurita memiliki potensi besar sebagai agen *quorum quenching* untuk mendukung pencegahan infeksi *E. tarda* dalam akuakultur. Penggunaan ekstrak ini tidak hanya efektif tetapi juga ramah lingkungan, serta menawarkan solusi inovatif untuk meningkatkan kesehatan ikan budidaya dan keberlanjutan industri akuakultur. Lebih lanjut, ekstrak tinta gurita dapat digunakan sebagai imunostimulan dalam industri akuakultur.

Kata Kunci: Akuakultur, Biofilm, *Edwardsiella tarda*, Ekstrak Tinta Gurita, *Quorum Quenching*

PENDAHULUAN

Edwardsiella mencakup spesies bakteri dari famili Enterobacteriaceae, yang pertama kali ditemukan pada tahun 1962 oleh Sakazaki di Jepang. Sejak saat itu, genus ini telah terdiri dari lima spesies, yaitu *E. ictaluri*, *E. tarda*, *E. hoshinae*, *E. piscicida*, dan *E. anguillarum*. Tiga spesies, yaitu *E. ictaluri*, *E. tarda*, dan *E. anguillarum*, telah dikaitkan dengan infeksi dan kematian banyak ikan (Goh et al., 2023; Reis et al., 2023). *Edwardsiella tarda* adalah bakteri Gram-negatif. Bakteri ini sering menyebabkan septikemia pada ikan yang mengakibatkan kerugian ekonomi yang besar dan kematian yang tinggi (hingga 70%) di budidaya ikan air tawar dan laut di banyak negara (Dung et al., 2024). Morfologi bakteri ini berukuran 1 µm x 2-3 µm, berbentuk batang pendek, non *acid fast*, tidak berspora dan tidak berkapsul. Bakteri ini bersifat fakultatif anaerob, fermentasi glukosa, tetapi negatif pada fermentasi laktosa, oksidase-negatif dan katalase-positif. Kultur pada media umum pada suhu 26-30°C selama 24-48 jam akan menghasilkan koloni bulat dengan permukaan rata/halus, sedikit cembung, tepi entire, transparan dengan ukuran sekitar 0,5 mm (Diniarti et al., 2019). Edwardsiellosis yang disebabkan bakteri ini memiliki tanda-tanda klinis yang bervariasi tergantung usia dan spesies yang terdampak, dan secara eksternal, ikan dapat menunjukkan hilangnya pigmentasi kulit, distensi abdomen, lesi hemoragik kulit, dan prolaps rektum. Lesi internal yang umum pada ikan meliputi asites, abses, peritonitis, kongesti hati, limpa, dan ginjal (Davies et al., 2018; Manzoor et al., 2023).

Sifat virulensi merupakan faktor utama bakteri patogen yang mengendalikan proses infeksi. Ada banyak faktor virulensi, seperti produksi toksin, adhesin, lipopolisakarida, polisakarida kapsuler, fagella, pili, siderofor, dan sistem sekresi. Protein sekresi, termasuk toksin dan enzim, dapat mendorong proses pembentukan biofilm. Pembentukan biofilm dapat terjadi dalam berbagai jenis ekosistem. Biofilm dapat memengaruhi sistem klinis dan non klinis (De Silva &

Heo, 2023). Biofilm adalah komunitas mikroorganisme, seperti bakteri, yang mampu hidup dan bereproduksi sebagai entitas kolektif yang dikenal sebagai koloni. Dengan kata lain, biofilm adalah biomassa hidup yang memiliki struktur komunitas. Struktur biofilm berfungsi untuk melindungi dan memungkinkan perluasan koloni (Sharma et al., 2023). Pembentukan biofilm oleh *E. tarda* diatur oleh penginderaan kuorum (*quorum sensing*) dan dibantu oleh banyak gen melalui aktivator transkripsi dan autoinducer (El-Tawab et al., 2021).

Penginderaan kuorum (QS), secara umum adalah mekanisme komunikasi canggih yang digunakan oleh bakteri untuk mengoordinasikan perilaku dalam suatu populasi (Neil et al., 2024). Sederhananya, QS adalah komunikasi antar sel mikroorganisme (Zhao et al., 2014). Penginderaan kuorum (QS) memicu pembentukan biofilm yang terdiri dari sel-sel bakteri dan matriks ekstraseluler yang terdiri dari protein, polisakarida, dan DNA yang dapat mencegah penetrasi antibiotik, sehingga mendorong toleransi antibiotik (Munir et al., 2020).

Mengganggu sistem QS dapat menjadi pilihan untuk mengendalikan infeksi *E. tarda* pada ikan. Salah satu strategi terapi antivirulensi yang paling banyak dipelajari adalah disrupsi QS, yang biasa disebut *Quorum Quenching* (QQ). Dibandingkan dengan pendekatan bakterisida/bakteriostatik, QQ cenderung tidak mendorong tekanan selektif yang kuat, sehingga meminimalkan perkembangan resistensi di antara patogen karena tidak secara langsung menargetkan pertumbuhan bakteri (Santos et al., 2021). Salah satu pilihan yang dapat dilakukan untuk mengganggu QS adalah dengan menggunakan senyawa fitokimia. Senyawa fitokimia telah terbukti mengganggu ekspresi patogenesis dengan mengganggu sistem QS bakteri (Samreen et al., 2022). Salah satu senyawa fitokimia yang dapat digunakan adalah alkaloid.

Alkaloid telah dilaporkan memiliki aktivitas penghambat terhadap biofilm bakteri (Ta & Arnason, 2016). Alkaloid diidentifikasi sebagai penghambat *quorum sensing* (QS) berdasarkan efeknya terhadap faktor dan proses virulensi yang diatur QS dan/atau interaksinya dengan target QS tertentu (Cushnie et al., 2014). Alkaloid dapat ditemukan pada tinta cephalopoda seperti tinta cumi-cumi (Affandi et al., 2019) dan tinta gurita (Affandi et al., 2023; Saputra et al., 2025). Penelitian sebelumnya menemukan bahwa tinta cumi-cumi (*Loligo duvauceli*) dan sotong lunak (*Sepioteuthis lessoniana*) memiliki aktivitas antimikroba yang kuat terhadap mikroorganisme penyebab biofilm (Hamdi et al., 2024; Kumar & Pasha, 2020). Tinta gurita juga diketahui memiliki potensi sebagai *Anti-Quorum Sensing* (Anti-QS) untuk mencegah pembentukan biofilm bakteri *Aeromonas hydrophila* (Affandi & Setyono, 2025). Berdasarkan latar belakang di atas, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis potensi ekstrak tinta gurita sebagai *quorum quenching* dalam mencegah pembentukan biofilm bakteri *Edwardsiella tarda* pada kegiatan akuakultur.

METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu

Penelitian studi literatur (*review literature*) ini dilakukan pada bulan Juli – Agustus 2025 di Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia.

Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian studi literatur (*review literature*) ini meliputi laptop, alat cas laptop, tetikus, dan artikel ilmiah dalam bentuk *softfile*.

Prosedur Penelitian

Akses informasi yang relevan untuk penyusunan artikel ini didapatkan dari *Google Scholar*, *Proquest*, dan *Elsevier*. Artikel yang digunakan yaitu sebanyak 46 jurnal dan 1 prosiding. Metode yang digunakan dalam artikel ini merupakan studi literatur sistematis (*systematic literature review*). Studi literatur sistematis adalah serangkaian kegiatan yang berkenaan dengan metode pengumpulan data pustaka, membaca dan mencatat, serta mengelola data penelitian secara obyektif, sistematis, analitis, dan kritis tentang potensi ekstrak tinta gurita sebagai *quorum quenching* dalam mencegah pembentukan biofilm bakteri *Edwardsiella tarda* pada akuakultur. Studi literatur ini menganalisis dengan rinci dan mendalam agar mendapatkan hasil yang objektif tentang potensi ekstrak tinta gurita sebagai *quorum quenching* dalam mencegah pembentukan biofilm bakteri *Edwardsiella tarda* pada akuakultur. Data yang dikumpulkan dan dianalisis merupakan data sekunder yang berupa hasil-hasil penelitian seperti buku, jurnal, dan artikel yang relevan (Affandi et al., 2023; Affandi & Setyono, 2023, 2024a, 2024b).

Analisis Data

Teknik analisis data dalam artikel ini dengan menggunakan teknik analisis isi (*content analysis*). Analisis data dimulai dengan menganalisis hasil penelitian dari yang paling relevan, relevan, dan cukup relevan. Peneliti lalu membaca abstrak dari setiap penelitian untuk memberikan penilaian apakah permasalahan yang dibahas sesuai dengan yang permasalahan hendak dipecahkan dalam penelitian ini. Selanjutnya mencatat bagian-bagian penting dan relevan dengan permasalahan penelitian dan diakhiri dengan penarikan simpulan (Affandi & Diamahesa, 2023; Affandi & Diniariwisan, 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Patogenitas *Edwardsiella tarda*

Patogenesis *E. tarda* bersifat multifaktorial. Mekanismenya masih kurang dipahami dan lokasi perlekatan serta penetrasinya belum diketahui, tetapi usus dan kulit yang terkelupas diduga kuat sebagai lokasi untuk penetrasi bakteri ini. Kemampuan *E. tarda* untuk melekat dan menembus sel epitel telah dilaporkan oleh beberapa peneliti. Mikroskop elektron menunjukkan pembentukan proyeksi ekstensif pada membran plasma sel HEp 2 yang diinduksi oleh *E. tarda*, yang menyerupai lipatan membran dan diduga terlibat dalam proses patogenesis. Edwardsiellosis yang disebabkan oleh *E. tarda* adalah penyakit septikemia yang ditandai dengan lesi luas pada kulit, otot, dan organ dalam. Ikan yang terinfeksi edwardsiellosis menunjukkan tanda-tanda gerakan spiral dan mati dengan mulut menganga dan operkula melebar yang mungkin disebabkan oleh perkembangan anemia yang menyebabkan kekurangan oksigen. Ikan menunjukkan lesi yang parah pada kulit, insang pucat, pembengkakan mata, sekresi lendir yang berlebihan, erosi sisik, dan ulkus pada beberapa kasus. Pembengkakan dan pendarahan pada anus yang menyebabkan kemerahan juga sering terlihat. Pada kasus perakut, kongesti

pada bagian ventral tubuh merupakan tanda yang paling sering terlihat (Ali et al., 2014).

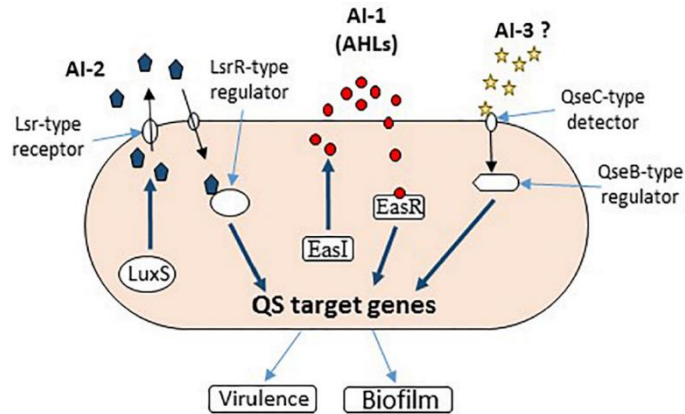
Pintu masuk patogen sangat penting dalam patogenesis bakteri dan merupakan langkah pertama dalam pembentukan penyakit pada inang. Sel bakteri paling sering ditemukan di saluran pencernaan tetapi juga terdeteksi di insang, hati, limpa, dan ginjal ikan yang terinfeksi secara alami dan eksperimental. Pintu masuk *E. tarda* yang virulen ke dalam inang terdeteksi di saluran pencernaan, insang, dan permukaan tubuh ikan, sedangkan *E. tarda* yang avirulen hanya ditemukan di saluran pencernaan melalui studi histologis dan kinetika infeksi. Dalam hal ini, insang dan permukaan tubuh mungkin merupakan pintu masuk utama *E. tarda* patogen ke dalam ikan (Y. Liu et al., 2012). Meningkatnya viabilitas bakteri dalam tubuh ikan akibat sistem kekebalan tubuh yang tidak mampu melawan infeksi menyebabkan *E. tarda* menyebar dan menginfeksi jaringan yang lebih dalam, mencapai sistem peredaran darah dan limfatik sehingga dapat memengaruhi kelangsungan hidup ikan. Hal ini dapat memengaruhi fungsi organ dalam, seperti hati, ginjal, limpa, dan otot inang. Infeksi ini dapat menyebabkan eksoftalmia, bintik-bintik merah pada perut, pembengkakan perut, serta pendarahan pada sirip dan kulit (Husna et al., 2022).

Faktor virulensi lain pada infeksi *E. tarda* adalah pembentukan biofilm yang merupakan agregasi mikroorganisme yang dapat memediasi perlekatan pada permukaan sel yang merupakan hal mendasar bagi patogenesis patogen karena biofilm menawarkan keuntungan dalam melawan perubahan lingkungan dan menghindari sistem pertahanan imun, seluler, dan kimia dari inangnya (Hassan et al., 2020). Biofilm adalah gumpalan mikroorganisme yang dapat memediasi adhesi pada permukaan sel. Kemampuan *E. tarda* untuk membentuk biofilm penting dalam patogenesis penyakit karena bakteri yang hidup dalam biofilm sulit dihilangkan dari permukaan, dapat resisten terhadap agen antimikroba dan sistem imun inang, serta mudah melekat pada jaringan inang, sehingga mengakibatkan infeksi, wabah penyakit serius, dan produksi faktor virulensi. Pembentukan biofilm dipimpin oleh sistem penginderaan kuorum (QS) yang merupakan mekanisme utama bakteri dalam berkomunikasi (Samir et al., 2022).

Kemampuan *E. tarda* membentuk biofilm merupakan salah satu aspek penting dari sifat virulensinya. Bakteri yang tumbuh dalam biofilm cenderung sulit dibersihkan dari permukaan, lebih tahan terhadap agen antimikroba dan sistem kekebalan tubuh inang, serta mudah menempel pada jaringan inang, yang pada akhirnya dapat menimbulkan infeksi, wabah penyakit yang serius, dan produksi berbagai faktor virulensi. Proses pembentukan biofilm memerlukan mekanisme penginderaan kuorum (QS), yaitu bentuk komunikasi antar bakteri yang memungkinkan mereka mencapai kepadatan populasi tertentu untuk membentuk struktur biofilm (El-Tawab et al., 2021).

Mekanisme Quorum Sensing Bakteri *Edwardsiella tarda*

Komunikasi antar sel melalui pensinyalan kuorum kini menjadi fokus utama dalam studi sosiobiologi bakteri. Sistem penginderaan kuorum (QS) berperan dalam mengatur berbagai aktivitas seluler. Beberapa fungsi yang dikendalikan QS meliputi bioluminesensi, motilitas, produksi faktor virulensi ekstraseluler, dan pembentukan biofilm (Talagrand-Reboul et al., 2017).



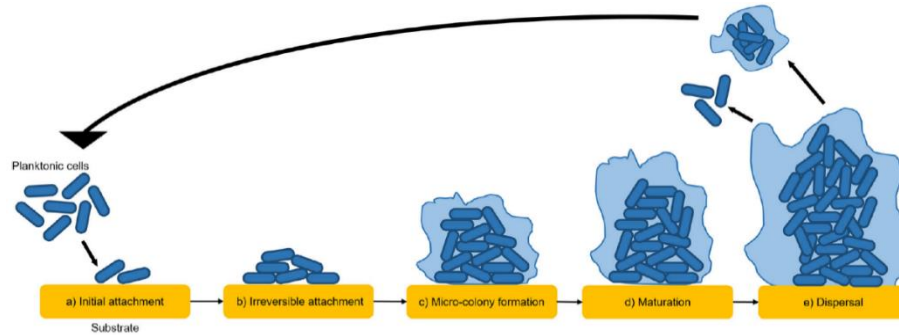
Gambar 1. Pensinyalan Penginderaan Kuorum QS pada *Edwardsiella tarda* dengan 3 AI (AI-1, AI-2, dan AI-3) (Lazar et al., 2021)

Bakteri *E. tarda* yang termasuk dalam Ordo Enterobacterales merupakan patogen dengan implikasi serius pada infeksi organ dalam ikan. Sayangnya, hanya sedikit yang diketahui tentang kontrol kuorum dan patogenesis pada kelompok bakteri ini. Bakteri ini menggunakan C4 dan C6-HSL sebagai molekul pensinyalan QS yang dikodekan oleh homolog LuxR yang telah ditemukan meregulasi adhesi bakteri dan pembentukan biofilm. QS yang dimediasi AI-2 juga diduga berperan dalam komunikasi antarsel dalam *E. tarda* (Gambar 1) karena reseptor tipe Lsr telah ditemukan pada jenis bakteri ini. Aktivitas AI-3 juga terdeteksi pada *E. tarda* yang diisolasi dari mikrobiota normal (Lazar et al., 2021).

Sebuah studi terbaru mendokumentasikan kloning dan karakterisasi regulator transkripsi, homolog luxR dari *E. tarda*, serta fungsionalitas dan spesifisitas protein EasR sebagai respons terhadap berbagai molekul pensinyalan AHL untuk mengaktifkan transkripsi gen dari promotor target QS (Gambar 1). Namun, transkriptomik komparatif genomik lebih lanjut diperlukan untuk menjelaskan kemungkinan peran QS terutama dalam patogenesis berbagai spesies *Edwardsiella* (Gambar 1) (Lazar et al., 2021).

Mekanisme Pembentukan Biofilm Bakteri *Edwardsiella tarda*

Pembentukan biofilm secara umum oleh bakteri patogen pada substrat/lapisan apa pun melibatkan lima tahap utama (H. Y. Liu et al., 2024). (1) Penempelan awal: pembentukan biofilm dimulai dengan perlekatan sel-sel planktonik yang hidup bebas ke permukaan biotik maupun abiotik. Sel-sel ini dapat menempel pada berbagai permukaan, termasuk jaringan hidup (misalnya sel epitel di usus dan saluran kemih). (2) Penempelan ireversibel: patogen bakteri menempel secara ireversibel pada permukaan melalui interaksi yang lebih kuat. (3) Pembentukan mikrokoloni: sel-sel bakteri berlapis-lapis terakumulasi membentuk koloni. (4) Pematangan: selama proses pematangan, matriks ekstraseluler disekresikan. Matriks dapat membentuk lebih dari 90% massa biofilm dan terdiri atas kumpulan berbagai biopolimer yang secara kolektif dikenal sebagai zat polimer ekstraseluler (EPS). (5) Dispersi: setelah biofilm matang, sel dapat terlepas dari permukaan dan bergerak untuk menempel pada substrat baru. Proses penyebarannya rumit, dan sejauh ini, penyemaian, pengikisan, dan pengelupasan telah diidentifikasi sebagai mekanisme penyebaran sel dalam biofilm.



Gambar 2. Mekanisme Pembentukan Biofilm Bakteri *Edwardsiella tarda* (H. Y. Liu et al., 2024)

Penginderaan kuorum (QS) merupakan mekanisme komunikasi antar bakteri yang berperan penting dalam mengatur proses pembentukan biofilm (Che et al., 2024; Markowska et al., 2024; Samrot et al., 2021). Sistem ini bergantung pada keberadaan molekul sinyal yang aktif sesuai dengan kepadatan populasi bakteri. QS juga mengontrol berbagai fungsi biologis lainnya, termasuk sekresi faktor virulensi, pergerakan bakteri (seperti berenang atau berkerumun), serta produksi cahaya (bioluminesensi) (Zhang et al., 2022).

Sistem komunikasi antarsel yang dikenal sebagai *quorum sensing* (QS) memiliki peran penting dalam pembentukan biofilm dengan mengatur ekspresi gen melalui molekul kecil yang disebut *autoinducer*. Pembentukan dan kestabilan struktur biofilm sangat bergantung pada QS, yang berfungsi sebagai mekanisme penghubung antar sel untuk mengontrol kepadatan populasi agar tidak melebihi ambang batas tertentu. Ketika konsentrasi *autoinducer* mencapai tingkat kuorum, molekul tersebut akan berikatan dengan reseptornya untuk mengatur aktivitas gen yang berperan dalam mempertahankan ukuran biofilm dan mengoordinasikan ekspresi virulensi, sehingga keberlangsungan komunitas biofilm sepenuhnya bergantung pada proses ini (Vetrivel et al., 2021).

Strategi Intervensi Terhadap Biofilm Bakteri *Edwardsiella tarda*

Penghambatan pembentukan biofilm bakteri dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan berikut (Ghosh et al., 2020):

- Mencegah adhesi awal bakteri ke permukaan, yaitu dengan memodifikasi permukaan menggunakan pelapis seperti antibiotik, ion logam, atau senyawa sintesis guna menghalangi perlekatan bakteri.
- Mengganggu sistem *quorum sensing*, dengan cara memblokir komunikasi antar bakteri melalui penghambatan molekul autoinduser menggunakan senyawa bioaktif yang berfungsi sebagai *quorum sensing inhibitor* (QSI), sehingga mengurangi pembentukan biofilm dan virulensi.
- Modulasi melalui molekul pensinyalan nukleotida kedua, seperti (p)ppGpp atau c-di-GMP, yang dapat menekan pembentukan biofilm dan meningkatkan sensitivitas bakteri terhadap antibiotik.
- Menghambat proses pematangan biofilm secara kimiawi, misalnya dengan menggunakan senyawa seperti glikolipid sintesis atau lipopolisakarida yang telah mengalami deasilasi untuk mengganggu struktur dinding sel dan mencegah penguatan biofilm.

e. Mengganggu biofilm yang telah matang, melalui strategi enzimatik seperti penggunaan Dispersin B atau DNase yang mampu menghancurkan komponen matriks biofilm seperti eksopolisakarida dan DNA ekstraseluler.

Intervensi terhadap biofilm bakteri dapat dilakukan dengan dua pendekatan utama, yaitu mencegah pematangan biofilm dan menghancurkan biofilm yang sudah terbentuk (Kang et al., 2023). Pencegahan pematangan meliputi:

- Menghambat adhesi bakteri, yakni dengan memodifikasi permukaan menggunakan bahan antibakteri atau struktur antifouling untuk mencegah bakteri menempel pada tahap awal pembentukan biofilm.
- Menghambat pembentukan matriks ekstraseluler (ECM), dengan menargetkan komponen seperti eksopolisakarida dan eDNA untuk meningkatkan sensitivitas biofilm terhadap antibiotik dan mengurangi daya lekat bakteri.
- Mengganggu komunikasi antar bakteri, melalui senyawa metabolit sekunder yang menghambat sistem *quorum sensing* sehingga menghalangi koordinasi pembentukan biofilm.
- Mengganggu metabolisme bakteri, dengan memodifikasi jalur metabolik seperti biosintesis purin untuk menghambat pertumbuhan biofilm berdasarkan kebutuhan metabolik spesifik.

Sementara itu, penghancuran biofilm yang sudah matang dapat dilakukan melalui:

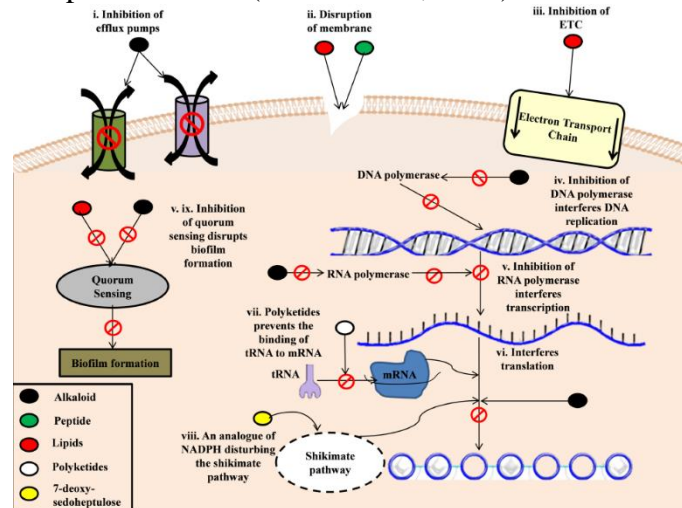
- Metode kimia, seperti penggunaan antibiotik, peptida antimikroba, enzim DNase, atau pembentukan spesies oksigen reaktif (ROS) yang merusak struktur biofilm melalui terapi fotodinamik atau enzim katalitik.
- Metode fisik, termasuk terapi fototermal (PTT) yang menghasilkan panas lokal untuk menghancurkan biofilm tanpa merusak jaringan sehat, serta penggunaan nanomotor berbentuk tajam atau bermagnet yang menembus biofilm dan menghasilkan ROS.
- Metode biologis, yaitu menggunakan bakteriofag spesifik yang menyerang bakteri dalam biofilm dan melepaskan enzim penghancur matriks, atau memanfaatkan probiotik yang bersaing dengan bakteri patogen untuk mengurangi kolonisasi dan mencegah pembentukan biofilm baru.

Mekanisme Kerja Alkaloid dalam Menghambat Biofilm Bakteri *Edwardsiella tarda*

Alkaloid merupakan senyawa heterosiklik yang mengandung nitrogen dan banyak ditemukan pada tumbuhan maupun hewan. Sejumlah besar alkaloid telah berhasil diidentifikasi, dan banyak di antaranya memiliki aktivitas antibakteri dengan spektrum luas serta efek samping yang minimal. Mekanisme kerja antibakteri alkaloid meliputi: (i) penghambatan sintesis dinding sel, (ii) pencegahan pembentukan biofilm, (iii) gangguan pada permeabilitas membran sel, (iv) penghambatan proses metabolisme, serta (v) penghambatan sintesis asam nukleat dan protein. Dalam menghambat biofilm, alkaloid bekerja dengan menurunkan ekspresi gen pengatur *quorum sensing* (QS) seperti *agrA* (*accessory gene regulator A*), serta menekan ekspresi gen terkait QS lainnya seperti *luxS* (*luciferase S-ribosylhomocysteinase*), *pfS* (*methylthioadenosine/S-adenosylhomocysteine nucleosidase*), *sdiA* (*suppressor of division inhibition A*), *hflX* (*high-frequency lysogenization X*), *motA* (*motor protein A*), dan *fliA* (*flagellar sigma factor A*) pada bakteri yang resistan terhadap antimikroba. Selain itu, alkaloid juga mengurangi

aktivitas molekul sinyal QS AI-2, yang turut menghambat proses pembentukan biofilm (Zhang et al., 2022).

Alkaloid memiliki pengaruh yang kuat terhadap biofilm bakteri dengan menghambat proses adhesi akibat terganggunya kemampuan motilitas sel. Selain itu, alkaloid berpotensi mengurangi jumlah eksopolisakarida (EPS) yang merupakan komponen utama dalam struktur biofilm. Berdasarkan hasil pengamatan, alkaloid mampu menahan perkembangan biofilm sejak tahap awal dengan cara menargetkan protein adhesin, merusak biofilm yang sudah terbentuk, serta menghambat produksi EPS (Mishra et al., 2020).



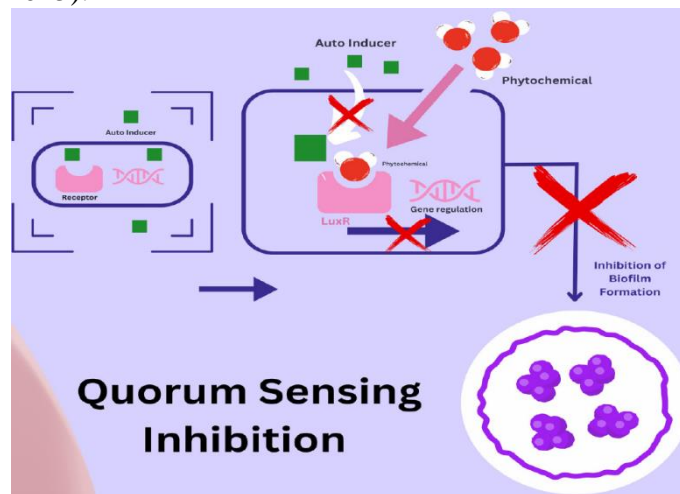
Gambar 3. Mekanisme Kerja Alkaloid dalam Menghambat Biofilm Bakteri *Edwardsiella tarda* (Kar et al., 2022)

Mekanisme alkaloid dalam menghambat biofilm bakteri *Edwardsiella tarda* ditunjukkan pada Gambar 3, dengan beberapa cara kerja sebagai berikut: (i) alkaloid menghambat aktivitas pompa efluks bakteri; (ii) peptida dan lipid mengganggu struktur membran sel, sehingga menyebabkan kebocoran isi sel; (iii) lipid juga mengganggu rantai transpor elektron, yang berdampak pada terganggunya fungsi sel; (iv) alkaloid menghambat kerja DNA polimerase, mengganggu proses replikasi DNA; (v) menghambat RNA polimerase, sehingga mengganggu proses transkripsi; (vi) alkaloid turut menghambat proses translasi; (vii) poliketida menghalangi pengikatan tRNA ke mRNA, yang menghentikan translasi; (viii) senyawa 7-deoksi-sedoheptulosa bertindak sebagai analog NAPH dalam jalur Shikimate dan menghambat translasi; dan (ix) penghambatan sistem *quorum sensing* oleh alkaloid turut mengganggu proses pembentukan biofilm (Kar et al., 2022).

Mekanisme Ekstrak Tinta Gurita Sebagai *Quorum Quenching* Pada Pembentukan Biofilm Bakteri *Edwardsiella tarda*

Tinta hewan cephalopoda seperti cumi-cumi mengandung senyawa betain, asam sinamat, dan kolin. Betain dan kolin tergolong sebagai alkaloid, sedangkan asam sinamat termasuk dalam kelompok asam karboksilat. Ketiga senyawa tersebut diketahui memiliki berbagai aktivitas biologis, seperti sifat antibakteri, antioksidan, antivirus, antijamur, dan lainnya (Affandi et al., 2019). Tinta gurita mengandung berbagai senyawa utama, termasuk alkaloid, melanin, asam amino, dan asam karboksilat. Berbagai kandungan tersebut memberikan tinta gurita beragam fungsi

biologis, seperti aktivitas antimikroba, antioksidan, antibakteri, antiretroviral, antikanker, antiulserogenik, antiinflamasi, antivirus, antijamur, serta sifat antiproliferatif (Affandi et al., 2023). Ekstrak tinta gurita memiliki aktivitas antioksidan yang kuat dengan nilai IC_{50} sebesar 94,4661 ppm. Ekstrak tinta gurita juga mengandung alkaloid, saponin, fenol, dan steroid berdasarkan hasil uji fitokimia dan FTIR. Senyawa-senyawa ini memiliki banyak peran, seperti imunostimulan, antibakteri, antivirus, antiparasit, antijamur, antioksidan, dan masih banyak lagi (Affandi, Azhar, et al., 2025). Tinta gurita diketahui mengandung senyawa alkaloid. Alkaloid berperan dalam merusak membran sel bakteri, yang turut berkontribusi dalam meningkatkan respons imun non-spesifik pada ikan serta menghambat pertumbuhan bakteri. Selain itu, alkaloid juga memiliki berbagai khasiat, salah satunya adalah aktivitas antimikroba (Affandi, Scabra, et al., 2025; Saputra et al., 2025).



Gambar 4. Mekanisme Ekstrak Tinta Gurita Sebagai *Quorum Quenching* Pada Pembentukan Biofilm Bakteri *Edwardsiella tarda* (Arya & Usha, 2024)

Mekanisme penghambatan *quorum sensing* oleh ekstrak tinta gurita yang mengandung alkaloid dilakukan dengan memblokir molekul autoinduser seperti AHL, autoinduser umum, dan autoinduser tipe 2. Komunikasi antar sel bakteri terjadi melalui sintesis dan pelepasan autoinduser yang kemudian berikatan dengan protein reseptor. Ekstrak tinta gurita bekerja dengan cara mengikat autoinduser secara kompetitif ke reseptornya, sehingga menghambat pengikatan alami dan menyebabkan penurunan ekspresi gen target yang dikendalikan oleh sistem *quorum sensing* (Arya & Usha, 2024). Proses penghambatan *quorum sensing* secara skematis disajikan pada Gambar 4.

PENUTUP

Kesimpulan

Ekstrak tinta gurita memiliki potensi sebagai agen *quorum quenching* untuk mencegah pembentukan biofilm bakteri *Edwardsiella tarda* dalam kegiatan akuakultur. Kandungan senyawa seperti alkaloid dalam tinta gurita dapat menghambat sistem komunikasi bakteri sehingga menekan ekspresi faktor virulensi. Hal ini menawarkan solusi inovatif yang ramah lingkungan untuk

mengurangi risiko infeksi pada ikan budidaya, sekaligus mencegah resistensi antibiotik. Lebih lanjut lagi ekstrak tinta gurita dapat dijadikan sebagai imunostimulan dalam kegiatan akuakultur.

Saran

Saran untuk penelitian lanjutan guna mengidentifikasi senyawa aktif spesifik dalam tinta gurita yang berperan dalam aktivitas *quorum quenching*. Uji aplikasi di lapangan juga perlu dilakukan untuk menilai efektivitas dan keamanan ekstrak tinta gurita dalam skala budidaya. Selain itu, pengembangan formulasi produk berbasis ekstrak tinta gurita sebagai agen antipatogen dan imunostimulan dapat menjadi langkah strategis dalam mendukung akuakultur berkelanjutan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Budidaya Perairan dan Universitas Mataram atas dukungannya kepada dosen-dosen muda dalam menulis artikel. Dukungan ini menjadi motivasi besar bagi penulis untuk terus berkarya dan mengembangkan diri. Melalui penulisan ini, diharapkan kompetensi dosen muda dapat terus meningkat secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Affandi, R. I., Azhar, F., Scabra, A. R., Muahiddah, N., Dwiyantri, S., Saputra, M. A., Diniariwisan, D., Rahmadani, T. B. C., Asri, Y., & Setyono, B. D. H. (2025). Bioactive compounds identification of octopus (*Octopus* sp.) ink extract as candidates for aquaculture immunostimulants: a preliminary study. *AAFL Bioflux*, 18(1), 500–511.
- Affandi, R. I., & Diamahesa, W. A. (2023). Potensi tanaman brotowali (*Tinospora cordifolia*) sebagai imunostimulan pada ikan. *LEMURU: Jurnal Ilmu Perikanan Dan Kelautan*, 5(3), 453–463. <https://doi.org/10.36526/jl.v5i3.2967>
- Affandi, R. I., & Diniariwisan, D. (2024). Potential use of fennel (*Foeniculum vulgare*) as fish immunostimulant: article review. *Jurnal Perikanan Unram*, 14(2), 657–672. <https://doi.org/10.29303/jp.v14i2.816>
- Affandi, R. I., Fadjar, M., & Ekawati, A. W. (2019). Active compounds on squid (*Loligo* sp.) ink extract powder as immunostimulant candidate to against shrimp disease. *Research Journal of Life Science*, 6(3), 150–161. <https://doi.org/10.21776/ub.rjls.2019.006.03.1>
- Affandi, R. I., Fadjar, M., Muahiddah, N., & Setyono, B. D. H. (2023). Potensi tinta gurita (*Octopus* sp.) sebagai imunostimulan pada udang vaname (*Litopenaeus vannamei*). *GANEC SWARA*, 17(1), 318–325. <https://doi.org/10.35327/gara.v17i1.403>
- Affandi, R. I., Scabra, A. R., & Saputra, M. A. (2025). Effect of octopus (*Octopus* sp.) ink extract on haematological of the catfish (*Clarias* sp.) infected with *Aeromonas hydrophila*. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries Zoology*, 29(3), 3375–3391.
- Affandi, R. I., & Setyono, B. D. H. (2023). Potensi tanaman sambiloto

- (*Andrographis paniculata*) sebagai imunostimulan pada ikan. *JURNAL VOKASI ILMU-ILMU PERIKANAN (JVIP)*, 4(1), 131–141. <https://doi.org/10.35726/jvip.v4i1.7109>
- Affandi, R. I., & Setyono, B. D. H. (2024a). Potensi tanaman lempuyang (*Zingiber zerumbet*) sebagai imunostimulan pada ikan. *JURNAL VOKASI ILMU-ILMU PERIKANAN (JVIP)*, 4(2), 182–193. <https://doi.org/10.35726/jvip.v4i2.7246>
- Affandi, R. I., & Setyono, B. D. H. (2024b). Potensi tanaman sambiloto (*Andrographis paniculata*) sebagai imunostimulan pada udang. *JURNAL VOKASI ILMU-ILMU PERIKANAN (JVIP)*, 5(1), 09–21. <https://doi.org/10.35726/jvip.v5i1.7333>
- Affandi, R. I., & Setyono, B. D. H. (2025). Potential of octopus ink extract as anti-quorum sensing to prevent *Aeromonas hydrophila* biofilm in aquaculture. *Jurnal Biologi Tropis*, 25(1), 459–470. <https://doi.org/10.29303/jbt.v25i1.8438>
- Ali, M. H., Chowdhury, F. S., Ashrafuzzaman, M., Chowdhury, M. A. N., Haque, M. R. U., Zinnah, K. M. A., & Rahman, M. M. (2014). Identification , pathogenecity , antibiotic and herbal sensitivity of *Edwardsiella tarda* causing fish disease in Bangladesh. *Current Research in Microbiology and Biotechnology*, 2(1), 292–297.
- Arya, S., & Usha, R. (2024). Bioprospecting and exploration of phytochemicals as quorum sensing inhibitors against cariogenic dental biofilm. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 18(1), 100–117. <https://doi.org/10.22207/JPAM.18.1.10>
- Che, J., Shi, J., Fang, C., Zeng, X., Wu, Z., Du, Q., Tu, M., & Pan, D. (2024). Elimination of pathogen biofilms via postbiotics from lactic acid bacteria: a promising method in food and biomedicine. *Microorganisms*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/microorganisms12040704>
- Cushnie, T. P. T., Cushnie, B., & Lamb, A. J. (2014). Alkaloids: An overview of their antibacterial, antibiotic-enhancing and antivirulence activities. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 44(5), 377–386. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2014.06.001>
- Davies, Y. M., de Oliveira, M. G. X., Cunha, M. P. V., Franco, L. S., Santos, S. L. P., Moreno, L. Z., de Moura Gomes, V. T., Sato, M. I. Z., Nardi, M. S., Moreno, A. M., Saidenberg, A. B., de Sá, L. R. M., & Knöbl, T. (2018). *Edwardsiella tarda* outbreak affecting fishes and aquatic birds in Brazil. *Veterinary Quarterly*, 38(1), 99–105. <https://doi.org/10.1080/01652176.2018.1540070>
- De Silva, L. A. D. S., & Heo, G. J. (2023). Biofilm formation of pathogenic bacteria isolated from aquatic animals. *Archives of Microbiology*, 205(1). <https://doi.org/10.1007/s00203-022-03332-8>
- Diniarti, E., Triyanto, T., & Murwantoko, M. (2019). Isolation, characterization and pathogenicity of *Edwardsiella tarda* a causative disease on freshwater fish in Yogyakarta. *Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada*, 21(1), 41–45. <https://doi.org/10.22146/jfs.39920>
- Dung, T. T., Thi, Q. V. C., & Trung, N. B. (2024). Identification and antibiotic resistance *Edwardsiella tarda* from clown knifefish (*Chitala chitala*) in the Mekong Delta, Vietnam. *HAYATI Journal of Biosciences*, 31(4), 641–651.

<https://doi.org/10.4308/hjb.31.4.641-651>

- El-Tawab, A. A. A., Rizk, A. M., Selim, A. O., & Elwakil, R. I. (2021). Biofilm of *Edwardsiella tarda* isolated from fresh water fishes and its role in the bacterial virulence. *Benha Veterinary Medical Journal*, *40*, 1–5.
- Ghosh, A., Jayaraman, N., & Chatterji, D. (2020). Small-molecule inhibition of bacterial biofilm. *ACS Omega*, *5*(7), 3108–3115. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03695>
- Goh, K. W., Abdul Kari, Z., Wee, W., Zakaria, N. N. A., Rahman, M. M., Kabir, M. A., Abdul Hamid, N. K., Tahiluddin, A. B., Kamarudin, A. S., Téllez–Isaías, G., & Wei, L. S. (2023). Exploring the roles of phytobiotics in relieving the impacts of *Edwardsiella tarda* infection on fish: a mini-review. *Frontiers in Veterinary Science*, *10*, 1149514. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1149514>
- Hamdi, S. A. H., El-Shazly, M. A. M., Fol, M. F., Mossalem, H. S., Ghareeb, M. A., Ibrahim, A. M., Aloufi, A. ., El-Ghany, M. N. A., & Korany, S. M. (2024). *Octopus vulgaris* ink chemical profiling and validation of its potential as antioxidant, antimicrobial, anti-cancer as well as anti-Schistosomal drug in vitro. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, *76*(5), 1–11. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-13217>
- Hassan, H. A., Ding, X., Zhang, X., & Zhu, G. (2020). Fish borne *Edwardsiella tarda* eha involved in the bacterial biofilm formation, hemolytic activity, adhesion capability and pathogenicity. *Archives of Microbiology*, *202*(4), 835–842. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01794-x>
- Husna, N., Kusdarwati, R., & Ulkhaq, M. F. (2022). Bacterial viability of *Edwardsiella tarda* from silver rasbora (*Rasbora argyrotaenia*) after infection with immersion methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1036*, 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1036/1/012005>
- Kang, X., Yang, X., He, Y., Guo, C., Li, Y., Ji, H., Qin, Y., & Wu, L. (2023). Strategies and materials for the prevention and treatment of biofilms. *Materials Today Bio*, *23*(June). <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100827>
- Kar, J., Ramrao, D. P., Zomuansangi, R., Lalbiakluangi, C., Singh, S. M., Joshi, N. C., Kumar, A., Kaushalendra, Mehta, S., Yadav, M. K., & Singh, P. K. (2022). Revisiting the role of cyanobacteria-derived metabolites as antimicrobial agent: A 21st century perspective. *Frontiers in Microbiology*, *13*(November), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1034471>
- Kumar, A., & Pasha, Y. (2020). Isolation and characterization of microorganisms from squid *Loligo duvauceli* and generation of microbe free crude ink. *International Journal of Pharmaceutical, Chemical & Biological Sciences*, *10*(3), 80–87.
- Lazar, V., Holban, A. M., Curutiu, C., & Chifiriuc, M. C. (2021). Modulation of quorum sensing and biofilms in less investigated gram-negative ESKAPE pathogens. *Frontiers in Microbiology*, *12*, 676510. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.676510>
- Liu, H. Y., Prentice, E. L., & Webber, M. A. (2024). Mechanisms of antimicrobial resistance in biofilms. *Npj Antimicrobials and Resistance*, *2*, 27. <https://doi.org/10.1038/s44259-024-00046-3>

- Liu, Y., Zhang, H., Liu, Y., Li, H., & Peng, X. (2012). Determination of the heterogeneous interactome between *Edwardsiella tarda* and fish gills. *Journal of Proteomics*, 75(4), 1119–1128. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2011.10.022>
- Manzoor, K., Rasool, F., Khan, N., Anjum, K. M., & Parveen, S. (2023). Resistance patterns of frequently applied antimicrobials and occurrence of antibiotic resistance genes in *Edwardsiella tarda* detected in edwardsiellosis-infected tilapia species of fish farms of Punjab in Pakistan. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(5), 668–679. <https://doi.org/10.4014/jmb.2301.01008>
- Markowska, K., Szymanek-Majchrzak, K., Pituch, H., & Majewska, A. (2024). Understanding quorum-sensing and biofilm forming in anaerobic bacterial communities. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(23). <https://doi.org/10.3390/ijms252312808>
- Mishra, R., Panda, A. K., De Mandal, S., Shakeel, M., Bisht, S. S., & Khan, J. (2020). Natural anti-biofilm agents: strategies to control biofilm-forming pathogens. *Frontiers in Microbiology*, 11(October). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.566325>
- Munir, S., Shah, A. A., Shahid, M., Manzoor, I., Aslam, B., Rasool, M. H., Saeed, M., Ayaz, S., & Khurshid, M. (2020). Quorum sensing interfering strategies and their implications in the management of biofilm-associated bacterial infections. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 63. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2020190555>
- Neil, B., Cheney, G. L., Rosenzweig, J. A., Sha, J., & Chopra, A. K. (2024). Antimicrobial resistance in aeromonads and new therapies targeting quorum sensing. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(1), 205. <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13055-z>
- Reis, F. Y. T., Rocha, V. P., Janampa-Sarmiento, P. C., Costa, H. L., Egger, R. C., Passos, N. C., de Assis, C. H. S., Carneiro, S. P., Santos, Á. F., Silva, B. A., Dorella, F. A., Leibowitz, M. P., Luz, R. K., Pierezan, F., Gallani, S. U., Tavares, G. C., & Figueiredo, H. C. P. (2023). *Edwardsiella tarda* in tambaqui (*Colossoma macropomum*): a pathogenicity, antimicrobial susceptibility, and genetic analysis of Brazilian Isolates. *Animals*, 13(18), 2910. <https://doi.org/10.3390/ani13182910>
- Samir, S., Awad, A., & Younis, G. (2022). Prevalence, virulence determinants and antimicrobial-resistant profile of edwardsiella tarda isolated from Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Egypt. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 10(5), 1031–1038. <https://doi.org/10.17582/journal.aavs/2022/10.5.1031.1038>
- Samreen, Qais, F. A., & Ahmad, I. (2022). Anti-quorum sensing and biofilm inhibitory effect of some medicinal plants against gram-negative bacterial pathogens: in vitro and in silico investigations. *Heliyon*, 8(10), e11113. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11113>
- Samrot, A. V., Mohamed, A. A., Faradjeva, E., Jie, L. S., Sze, C. H., Arif, A., Sean, T. C., Michael, E. N., Mun, C. Y., Qi, N. X., Mok, P. L., & Kumar, S. S. (2021). Mechanisms and impact of biofilms and targeting of biofilms using bioactive compounds—a review. *Medicina (Lithuania)*, 57(8), 1–28. <https://doi.org/10.3390/medicina57080839>

- Santos, R. A., Monteiro, M., Rangel, F., Jerusik, R., Saavedra, M. J., Carvalho, A. P., Oliva-Teles, A., & Serra, C. R. (2021). *Bacillus* spp. inhibit *Edwardsiella tarda* quorum-sensing and fish infection. *Marine Drugs*, 19(11), 602. <https://doi.org/10.3390/md19110602>
- Saputra, M. A., Scabra, A. R., & Affandi, R. I. (2025). Effectiveness of octopus (*Octopus* sp.) ink extract on the growth of catfish (*Clarias* sp.) infected with *Aeromonas hydrophila*. *Journal of Fish Health*, 5(1), 1–14. <https://doi.org/10.29303/jfh.v5i1.6102>
- Sharma, S., Mohler, J., Mahajan, S. D., Schwartz, S. A., Bruggemann, L., & Aalinkeel, R. (2023). Microbial biofilm: a review on formation, infection, antibiotic resistance, control measures, and innovative treatment. *Microorganisms*, 11(6), 1614. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061614>
- Ta, C. A. K., & Arnason, J. T. (2016). Mini review of phytochemicals and plant taxa with activity as microbial biofilm and quorum sensing inhibitors. *Molecules*, 21(1). <https://doi.org/10.3390/molecules21010029>
- Talagrand-Reboul, E., Jumas-Bilak, E., & Lamy, B. (2017). The social life of *Aeromonas* through biofilm and quorum sensing systems. *Frontiers in Microbiology*, 8(JAN). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00037>
- Vetrivel, A., Ramasamy, M., Vetrivel, P., Natchimuthu, S., Arunachalam, S., Kim, G.-S., & Murugesan, R. (2021). *Pseudomonas aeruginosa* biofilm formation and its control. *Biologics*, 1(3), 312–336. <https://doi.org/10.3390/biologics1030019>
- Zhang, M., Han, W., Gu, J., Qiu, C., Jiang, Q., Dong, J., Lei, L., & Li, F. (2022). Recent advances on the regulation of bacterial biofilm formation by herbal medicines. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1039297>
- Zhao, J., Chen, M., Quan, C. S., & Fan, S. D. (2014). Mechanisms of quorum sensing and strategies for quorum sensing disruption in aquaculture pathogens. *Journal of Fish Diseases*, 38(9), 771–786. <https://doi.org/10.1111/jfd.12299>