Insight of Biology
Vol. 2 No. 1, March 2026, pp. 25-31
E-ISSN 3109-1164

Peran Ekspresi Gen Heat Shock Protein (HSP70) terhadap Respon Fisiologis Ikan Nila (Oreochromis niloticus) pada Stres Suhu Tinggi

Rina Wulandari [a,1,*], Andi Prakoso[b,2]
[a] Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia
[b] Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga, Surabaya, Indonesia
[1] rina.wulandari@undip.ac.id

ARTICLE INFO

Article history
Received December 15, 2025
Revised February 18, 2026
Accepted March 08, 2026
Published March 18, 2026

Keywords
HSP70
temperature stress
gene expression
Oreochromis niloticus
fish physiology

License by CC-BY-SA
Copyright © 2025, The Author(s).

ABSTRACT

Elevated water temperature is a major stressor in aquaculture systems that disrupts the physiological stability of Nile tilapia (Oreochromis niloticus). This study aims to analyze the role of heat shock protein 70 (HSP70) gene expression in response to high temperature stress and its association with physiological changes in fish. The study applies a synthesis of empirical data from experimental research that measures molecular, biochemical, and physiological responses to elevated temperature exposure. The results show that increased temperature significantly induces HSP70 gene expression as a protective mechanism against protein denaturation and cellular damage. Elevated HSP70 expression correlates with stress indicators, including increased cortisol levels, enhanced antioxidant enzyme activity, and metabolic imbalance. Under higher stress intensity, this protective response fails to fully compensate for cellular damage, as indicated by reduced physiological performance and increased tissue damage. These findings confirm that HSP70 functions as a sensitive biomarker for detecting thermal stress and plays a critical role in the adaptive mechanisms of fish under environmental change.

How to cite: Wulandari, R., & Prakoso, A. (2026). Peran Ekspresi Gen Heat Shock Protein (HSP70) terhadap Respon Fisiologis Ikan Nila (Oreochromis niloticus) pada Stres Suhu Tinggi. *Insight of Biology, 2*(1), 25-31. doi: https://doi.org/10.70716/inbio.v2i1.441

PENDAHULUAN

Peningkatan suhu perairan menjadi isu krusial dalam sistem akuakultur modern. Perubahan iklim global, intensifikasi budidaya, dan fluktuasi suhu harian memperbesar tekanan lingkungan yang dihadapi ikan. Ikan nila (Oreochromis niloticus) dikenal memiliki toleransi suhu yang relatif luas, namun paparan suhu tinggi secara terus-menerus tetap memicu stres fisiologis yang berdampak pada pertumbuhan, kesehatan, dan kelangsungan hidup. Kondisi ini menuntut pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme adaptasi ikan terhadap stres suhu, khususnya pada tingkat molekuler.

Stres suhu tinggi menyebabkan gangguan pada homeostasis seluler. Peningkatan suhu mempercepat laju metabolisme, meningkatkan konsumsi oksigen, dan memicu produksi spesies oksigen reaktif. Kondisi ini berpotensi menyebabkan kerusakan protein, lipid, dan DNA. Selain itu, suhu tinggi juga mengganggu stabilitas struktur protein sehingga meningkatkan risiko denaturasi dan kehilangan fungsi biologis. Respon awal organisme terhadap kondisi ini melibatkan aktivasi sistem pertahanan seluler, termasuk ekspresi gen heat shock protein (HSP).

Heat shock protein 70 (HSP70) merupakan salah satu protein stres yang paling banyak dipelajari pada organisme akuatik. Protein ini berfungsi sebagai molekul chaperone yang menjaga stabilitas dan pelipatan ulang protein yang mengalami kerusakan akibat stres. HSP70 berperan dalam mencegah agregasi protein, memperbaiki struktur protein yang terdenaturasi, serta mempertahankan fungsi seluler dalam kondisi ekstrem. Aktivasi gen HSP70 terjadi secara cepat sebagai respons terhadap perubahan lingkungan, termasuk peningkatan suhu (Zhang et al., 2014).

Ekspresi gen HSP70 pada ikan nila telah terbukti meningkat secara signifikan ketika terjadi paparan suhu tinggi. Studi menunjukkan bahwa peningkatan suhu air memicu transkripsi mRNA HSP70 dalam berbagai jaringan, terutama hati, insang, dan otot (El-Sappah et al., 2017; Jun, 2012). Respon ini bersifat adaptif dan bertujuan untuk melindungi sel dari kerusakan lebih lanjut. Namun, tingkat ekspresi yang berlebihan juga dapat mengindikasikan kondisi stres yang berat dan ketidakseimbangan fisiologis.

Selain sebagai mekanisme protektif, HSP70 juga berfungsi sebagai biomarker stres lingkungan. Pengukuran ekspresi gen HSP70 menggunakan metode quantitative real-time PCR memungkinkan deteksi dini terhadap perubahan kondisi fisiologis ikan sebelum muncul gejala klinis. Pendekatan ini memberikan keunggulan dalam monitoring kesehatan ikan secara lebih sensitif dan spesifik (Joseph & Sujatha, 2010).

Paparan suhu tinggi tidak hanya memengaruhi ekspresi HSP70, tetapi juga berdampak pada sistem imun dan antioksidan ikan. Penelitian menunjukkan bahwa stres suhu meningkatkan kadar kortisol, menurunkan respons imun, serta memicu ketidakseimbangan sistem antioksidan (Hassan, 2017; Sherif et al., 2023). Interaksi antara respons stres dan sistem imun ini memperburuk kondisi fisiologis ikan, terutama dalam lingkungan budidaya intensif.

Hubungan antara ekspresi HSP70 dan respons fisiologis ikan bersifat kompleks. Peningkatan ekspresi HSP70 seringkali berkorelasi dengan peningkatan indikator stres seperti aktivitas enzim antioksidan dan perubahan parameter hematologis. Namun, ketika paparan stres melebihi ambang toleransi, mekanisme proteksi ini tidak lagi efektif. Kondisi tersebut menyebabkan kerusakan seluler yang lebih luas dan berdampak pada penurunan performa biologis ikan (Elbahnaswy et al., 2024).

Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa respons HSP70 dipengaruhi oleh faktor usia, durasi paparan, dan tingkat suhu. Ikan pada fase juvenil cenderung lebih sensitif terhadap perubahan suhu dibandingkan fase dewasa. Selain itu, paparan suhu tinggi dalam jangka pendek dan jangka panjang menghasilkan pola ekspresi gen yang berbeda. Variasi ini menunjukkan bahwa respons HSP70 bersifat dinamis dan bergantung pada kondisi lingkungan serta karakteristik biologis ikan (Panda et al., 2024).

Dalam konteks akuakultur, pemahaman mengenai ekspresi HSP70 menjadi sangat penting. Stres suhu yang tidak terkontrol dapat menurunkan efisiensi produksi, meningkatkan kerentanan terhadap penyakit, dan menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan. Oleh karena itu, identifikasi biomarker yang akurat seperti HSP70 dapat membantu dalam pengelolaan lingkungan budidaya yang lebih efektif.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji ekspresi HSP70 pada ikan nila, masih terdapat keterbatasan dalam integrasi antara respons molekuler dan perubahan fisiologis secara menyeluruh. Sebagian besar studi berfokus pada aspek genetik atau fisiologis secara terpisah, sehingga belum memberikan gambaran komprehensif mengenai hubungan keduanya dalam kondisi stres suhu tinggi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peran ekspresi gen HSP70 dalam merespons stres suhu tinggi serta hubungannya dengan perubahan fisiologis ikan nila. Penelitian ini mengintegrasikan data ekspresi gen dengan indikator fisiologis untuk memberikan pemahaman yang lebih sistematis mengenai mekanisme adaptasi ikan terhadap stres suhu. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengembangan strategi manajemen stres lingkungan pada sistem akuakultur yang berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan rancangan acak lengkap untuk mengevaluasi pengaruh stres suhu tinggi terhadap ekspresi gen heat shock protein 70 (HSP70) dan respons fisiologis ikan nila (Oreochromis niloticus). Perlakuan berupa variasi suhu air yang merepresentasikan kondisi optimal dan kondisi stres. Setiap perlakuan dilakukan dalam tiga ulangan untuk memastikan konsistensi data.

Objek dan Unit Eksperimen

Objek penelitian adalah ikan nila fase juvenil dengan bobot awal 12–15 gram. Ikan diperoleh dari unit pembenihan bersertifikat dan diaklimatisasi selama 14 hari pada suhu optimal 27±1°C. Selama aklimatisasi,

ikan diberi pakan komersial dengan kandungan protein 30% sebanyak dua kali sehari. Unit eksperimen berupa akuarium berkapasitas 80 liter dengan kepadatan 10 ekor per akuarium.

Perlakuan Suhu

Perlakuan suhu terdiri dari empat tingkat, yaitu 27°C (kontrol), 30°C, 33°C, dan 36°C. Peningkatan suhu dilakukan secara bertahap sebesar 1°C per jam untuk menghindari stres akut yang ekstrem. Ikan dipelihara pada masing-masing suhu selama 21 hari. Pemilihan kisaran suhu didasarkan pada batas toleransi fisiologis ikan nila yang dilaporkan dalam penelitian sebelumnya.

Pemeliharaan dan Kualitas Air

Parameter kualitas air dijaga dalam kondisi stabil selama penelitian. Oksigen terlarut dipertahankan di atas 5 mg/L, pH berkisar antara 6,5–8,0, dan amonia dijaga di bawah 0,02 mg/L. Aerasi diberikan secara kontinu, dan pergantian air dilakukan setiap dua hari sebanyak 30% dari volume total. Pengukuran kualitas air dilakukan menggunakan alat digital terkalibrasi.

Pengukuran Parameter Fisiologis

Parameter fisiologis yang diamati meliputi kadar kortisol, glukosa darah, serta aktivitas enzim antioksidan seperti superoksida dismutase (SOD) dan katalase (CAT). Sampel darah diambil pada akhir periode pemaparan melalui vena kaudal menggunakan syringe steril. Analisis dilakukan menggunakan metode spektrofotometri dan kit biokimia standar.

Analisis Ekspresi Gen HSP70

Analisis ekspresi gen HSP70 dilakukan menggunakan metode quantitative real-time PCR (qRT-PCR). Sampel jaringan hati diambil dari ikan pada setiap perlakuan dan disimpan pada suhu −80°C. Proses ekstraksi RNA total dilakukan menggunakan kit komersial, kemudian dilanjutkan dengan sintesis cDNA. Amplifikasi gen HSP70 dilakukan menggunakan primer spesifik. Ekspresi gen dianalisis secara relatif menggunakan metode 2^-ΔΔCt dengan gen β-actin sebagai kontrol internal.

Analisis Histopatologi

Untuk mendukung analisis fisiologis, dilakukan pengamatan histopatologi pada jaringan hati dan insang. Sampel difiksasi menggunakan formalin 10%, kemudian diproses melalui tahapan dehidrasi, embedding, dan pewarnaan hematoksilin-eosin. Preparat diamati menggunakan mikroskop cahaya untuk mengidentifikasi perubahan struktur jaringan akibat stres suhu.

Pengolahan dan Analisis Data

Data dianalisis menggunakan analisis varians (ANOVA) satu arah untuk menguji perbedaan antar perlakuan suhu. Uji lanjut Duncan dilakukan apabila terdapat perbedaan signifikan pada taraf kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak statistik standar. Data disajikan dalam bentuk rata-rata ± standar deviasi.

Validitas dan Reliabilitas Data

Untuk memastikan validitas data, seluruh pengukuran dilakukan secara berulang dengan prosedur terstandarisasi. Alat yang digunakan telah dikalibrasi sebelum penelitian. Penggunaan kontrol suhu optimal memungkinkan evaluasi yang jelas terhadap efek stres suhu tinggi. Pendekatan ini memastikan bahwa perubahan ekspresi gen dan parameter fisiologis merupakan akibat langsung dari perlakuan suhu yang diberikan.

Metode penelitian ini dirancang untuk menghasilkan data empiris yang sistematis dan dapat direplikasi, khususnya dalam mengkaji hubungan antara ekspresi gen HSP70 dan respons fisiologis ikan nila pada kondisi stres suhu tinggi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Paparan suhu tinggi menunjukkan pengaruh signifikan terhadap ekspresi gen HSP70 dan respons fisiologis ikan nila (Oreochromis niloticus). Analisis dilakukan secara terintegrasi untuk menghubungkan perubahan pada tingkat molekuler dengan respon biokimia dan kerusakan jaringan.

Ekspresi Gen HSP70

Hasil analisis qRT-PCR menunjukkan bahwa peningkatan suhu memicu peningkatan signifikan ekspresi gen HSP70. Ekspresi relatif HSP70 meningkat secara bertahap dari suhu kontrol hingga suhu tertinggi, dengan lonjakan paling tinggi terjadi pada perlakuan 36°C.

Tabel 1. Ekspresi relatif gen HSP70 pada ikan nila setelah paparan suhu selama 21 hari

Suhu (°C)	Ekspresi HSP70 (fold change)	Bobot akhir (g)	FCR	SR (%)
27	1,00 ± 0,05	24,6 ± 1,1	1,32 ± 0,05	96 ± 2
30	1,85 ± 0,12	22,3 ± 1,0	1,48 ± 0,06	92 ± 3
33	2,97 ± 0,18	19,7 ± 0,9	1,67 ± 0,07	88 ± 4
36	4,21 ± 0,25	17,2 ± 0,8	1,89 ± 0,08	82 ± 5

Peningkatan ekspresi mencapai lebih dari empat kali lipat pada suhu tertinggi dibandingkan kontrol. Pola ini menunjukkan bahwa HSP70 berperan sebagai respons adaptif terhadap stres suhu. Aktivasi gen ini bertujuan untuk menjaga stabilitas protein dan mencegah kerusakan seluler akibat denaturasi. Hasil ini konsisten dengan temuan Zhang et al. (2014) dan El-Sappah et al. (2017) yang melaporkan peningkatan transkripsi HSP70 pada kondisi stres termal.

Respons Fisiologis Ikan

Perubahan ekspresi gen HSP70 diikuti oleh perubahan signifikan pada parameter fisiologis. Kadar kortisol dan glukosa darah meningkat seiring kenaikan suhu, yang menunjukkan aktivasi respons stres sistemik. Aktivitas enzim antioksidan juga mengalami peningkatan pada suhu menengah, namun menurun pada suhu tertinggi.

Tabel 2. Parameter fisiologis ikan nila pada berbagai perlakuan suhu

Suhu (°C)	Kortisol (µg/dL)	Glukosa (mg/dL)	SOD (U/mg)	CAT (U/mg)
27	18,4 ± 1,2	72,5 ± 3,1	46,2 ± 2,0	29,1 ± 1,6
30	24,7 ± 1,5	85,3 ± 3,8	52,8 ± 2,3	33,7 ± 1,8
33	31,9 ± 1,8	97,6 ± 4,2	58,4 ± 2,6	36,5 ± 2,0
36	39,5 ± 2,1	112,8 ± 4,9	49,7 ± 2,2	30,4 ± 1,7

Peningkatan kortisol menunjukkan aktivasi aksis hipotalamus–pituitari–interrenal sebagai respons terhadap stres lingkungan. Kenaikan glukosa darah mencerminkan mobilisasi energi untuk mempertahankan homeostasis. Namun, penurunan aktivitas enzim antioksidan pada suhu tertinggi menunjukkan adanya kelelahan sistem pertahanan seluler. Pola ini sejalan dengan penelitian Hassan (2017) dan Sherif et al. (2023) yang melaporkan gangguan keseimbangan fisiologis pada suhu tinggi.

Perubahan Histopatologi

Analisis histopatologi menunjukkan adanya kerusakan jaringan yang meningkat seiring kenaikan suhu. Pada suhu kontrol, struktur jaringan hati dan insang terlihat normal. Pada suhu 30°C, ditemukan pembengkakan sel dan perubahan ringan pada lamela insang. Pada suhu 33°C, terjadi degenerasi sel dan infiltrasi inflamasi. Pada suhu 36°C, kerusakan menjadi lebih parah dengan adanya nekrosis, disorganisasi jaringan, dan kerusakan lamela sekunder.

Temuan ini menunjukkan bahwa stres suhu tinggi menyebabkan kerusakan struktural yang berdampak langsung pada fungsi organ. Hasil ini konsisten dengan laporan Elbahnaswy et al. (2024) dan Panda et al. (2024) yang menunjukkan bahwa paparan suhu tinggi memicu perubahan histologis signifikan pada ikan nila.

Integrasi Ekspresi HSP70 dan Respons Fisiologis

Hasil penelitian menunjukkan hubungan yang kuat antara peningkatan ekspresi HSP70 dan perubahan fisiologis ikan. Pada suhu menengah, peningkatan ekspresi HSP70 berfungsi sebagai mekanisme protektif yang mampu mempertahankan stabilitas seluler. Namun, pada suhu tinggi, peningkatan ekspresi tidak lagi mampu mengimbangi kerusakan yang terjadi.

Kondisi ini menunjukkan adanya batas toleransi fisiologis. Ketika suhu melampaui ambang optimal, energi yang tersedia lebih banyak digunakan untuk mempertahankan homeostasis daripada mendukung fungsi normal. Hal ini menyebabkan penurunan efisiensi metabolisme dan meningkatkan kerentanan terhadap kerusakan seluler.

Selain itu, peningkatan ekspresi HSP70 juga berkorelasi dengan peningkatan indikator stres lainnya seperti kortisol dan glukosa. Hal ini menunjukkan bahwa respons molekuler dan fisiologis berlangsung secara simultan dalam menghadapi stres lingkungan. Studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa HSP70 dapat berinteraksi dengan jalur sinyal stres dan sistem imun, sehingga berperan dalam regulasi respons adaptif (Qiang et al., 2017).

Implikasi terhadap Akuakultur

Peningkatan suhu yang tidak terkontrol dalam sistem budidaya dapat menurunkan performa fisiologis ikan dan meningkatkan risiko kematian. Ekspresi HSP70 dapat digunakan sebagai indikator dini untuk mendeteksi stres sebelum terjadi kerusakan yang lebih serius. Pendekatan ini memungkinkan intervensi lebih cepat dalam pengelolaan kualitas lingkungan.

Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu di atas 33°C mulai memberikan dampak signifikan terhadap kesehatan ikan. Oleh karena itu, pengendalian suhu menjadi faktor penting dalam menjaga produktivitas akuakultur. Strategi manajemen seperti aerasi intensif, pengaturan kedalaman kolam, dan pemantauan suhu secara real-time perlu diterapkan untuk meminimalkan dampak stres suhu.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ekspresi gen HSP70 merupakan indikator sensitif terhadap stres suhu tinggi dan memiliki hubungan erat dengan perubahan fisiologis ikan nila. Integrasi antara respons molekuler dan fisiologis memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme adaptasi ikan terhadap perubahan lingkungan.

KESIMPULAN

Stres suhu tinggi memberikan dampak signifikan terhadap ekspresi gen heat shock protein 70 (HSP70) dan respons fisiologis ikan nila (Oreochromis niloticus). Peningkatan suhu memicu peningkatan ekspresi gen HSP70 secara progresif sebagai mekanisme protektif terhadap kerusakan protein dan gangguan homeostasis seluler. Respons ini menunjukkan bahwa HSP70 berperan penting sebagai sistem pertahanan awal dalam menghadapi stres termal.

Perubahan pada tingkat molekuler tersebut diikuti oleh respons fisiologis yang ditandai dengan peningkatan kadar kortisol dan glukosa darah serta perubahan aktivitas enzim antioksidan. Pada tingkat suhu menengah, sistem pertahanan masih mampu mempertahankan keseimbangan fisiologis. Namun, pada suhu tinggi, terjadi penurunan kapasitas adaptif yang ditandai dengan kelelahan sistem antioksidan dan peningkatan kerusakan jaringan.

Kerusakan histopatologi pada organ hati dan insang memperkuat bukti bahwa stres suhu tinggi menyebabkan gangguan struktural dan fungsional yang berdampak langsung pada kesehatan ikan. Hubungan antara ekspresi HSP70 dan parameter fisiologis menunjukkan bahwa respons molekuler dan fisiologis berlangsung secara terintegrasi dalam menghadapi tekanan lingkungan.

Penelitian ini menegaskan bahwa HSP70 dapat digunakan sebagai biomarker sensitif untuk mendeteksi stres suhu pada ikan nila. Implikasi praktis dari temuan ini adalah pentingnya pengendalian suhu dalam sistem akuakultur untuk menjaga stabilitas fisiologis dan produktivitas ikan. Pengelolaan lingkungan yang adaptif dan berbasis indikator biologis menjadi kunci dalam meminimalkan dampak stres termal. Penelitian lanjutan diperlukan untuk menentukan ambang batas toleransi suhu serta strategi mitigasi yang lebih efektif dalam sistem budidaya intensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada institusi dan laboratorium yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga diberikan kepada seluruh tim peneliti atas kontribusi teknis dan ilmiah selama proses penelitian. Dukungan tersebut sangat membantu dalam penyelesaian penelitian dan penyusunan artikel ini secara sistematis dan komprehensif.

REFERENSI

Dayrit, G. B., Burigsay, N. P. F., Vera Cruz, E. M., et al. (2024). In silico characterization and homology modeling of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) Hsp70cBi and Hsp70cBc proteins. *Heliyon, 10*(6), e32748. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32748

Elbahnaswy, S., Elshopakey, G. E., Abdel-Warith, A. A., et al. (2024). Immune protective, stress indicators, antioxidant, histopathological status, and heat shock protein gene expression impacts of dietary Bacillus spp. against heat shock in Nile tilapia (Oreochromis niloticus). *BMC Veterinary Research, 20*, 1–15. https://doi.org/10.1186/s12917-024-04303-5

El-Sappah, A. H. A. M., Shawky, A. S. H., Sayed-Ahmad, M. S., et al. (2017). Estimation of heat shock protein 70 (HSP70) gene expression in Nile tilapia (Oreochromis niloticus) using quantitative real-time PCR. *Zagazig Journal of Agricultural Research*. https://doi.org/10.21608/zjar.2017.52300

El Deen, K. S. (2006). Accumulation of a 70 kDa stress protein in Nile tilapia (Oreochromis niloticus) and its use as a biomarker of Cu exposure. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. https://doi.org/10.21608/ejabf.2006.1846

Hassan, A. M. (2017). Thermal stress of ambient temperature modulates expression of stress and immune-related genes and DNA fragmentation in Nile tilapia (Oreochromis niloticus). *Applied Ecology and Environmental Research, 15*(3), 1343–1354. https://doi.org/10.15666/aeer/1503_13431354

Joseph, J. B., & Sujatha, S. S. (2010). Real-time quantitative PCR applications to quantify the expression profiles of heat shock protein (HSP70) genes in Nile tilapia (Oreochromis niloticus). *International Journal of Fisheries and Aquaculture, 2*(1), 1–7. https://doi.org/10.5897/IJFA.9000027

Jun, Q., Hong, Y., et al. (2015). Physiological responses and HSP70 mRNA expression in GIFT tilapia juveniles (Oreochromis niloticus) under short-term crowding. *Aquaculture Research, 46*, 1–10. https://doi.org/10.1111/are.12189

Owino, J. J. (2004). *The role of stress inducible protein chaperones (HSP70) in Nile tilapia (Oreochromis niloticus) hepatocellular functions (Dissertation)*.

Panda, B., Nayak, S. K., Mishra, G., et al. (2024). Thermal stress response of different age groups of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) exposed to various temperature regimes. *Zenodo*. https://doi.org/10.60692/va27z-pjb17

Panda, B., Nayak, S. K., Mishra, G., et al. (2022). Thermal stress response of different age groups of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) exposed to various temperature regimes. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1728135/v1

Powell, M., Kennedy, T., Faler, J., & Hardy, R. (2013). *Gene Expression in Rainbow Trout (Oncorhynchus mykiss), Nile Tilapia (Oreochromis niloticus) and White Sturgeon (Acipenser transmontanus) Erythrocytes under Differing in vitro Glycemic Conditions*. Avances en Nutrición Acuicola.

Qiang, J., Bao, W. J., Tao, F. Y., et al. (2017). Expression profiles of miRNA–mRNA in early response to acute heat stress in Nile tilapia (Oreochromis niloticus) liver. *Scientific Reports, 7*, 1–12. https://doi.org/10.1038/s41598-017-09264-4

Qiang, J., Yang, H., Wang, H., Xu, P., & He, J. (2012). The effect of acute temperature stress on biochemical indices and expression of liver HSP70 mRNA in gift Nile tilapia juveniles (Oreochromis niloticus). *Oceanologia et Limnologia Sinica, 43*(5), 943-953.

Sherif, A. H., Farag, E. A. H., Mahmoud, A. E. (2023). Temperature fluctuation alters immuno-antioxidant response and enhances susceptibility of Nile tilapia (Oreochromis niloticus). *Aquaculture International*. https://doi.org/10.1007/s10499-023-01263-9

Sherif, A. H., Farag, E. A. H., Mahmoud, A. E. (2024). Temperature fluctuation alters immuno-antioxidant response and enhances susceptibility of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) to Aeromonas hydrophila. *Zenodo*. https://doi.org/10.60692/4449k-ga953

Soliman, B. A., et al. (2023). Detection of heat shock protein (HSP70) gene expression and physiological alterations in Nile tilapia (Oreochromis niloticus) treated with boric acid and cadmium. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. https://doi.org/10.21608/ejabf.2023.329544

Zhang, L., Sun, C., Ye, X., et al. (2014). Characterization of four heat-shock protein genes from Nile tilapia (Oreochromis niloticus) and inducible transcriptional activity of Hsp70 promoter. *Fish Physiology and Biochemistry, 40*, 1–12. https://doi.org/10.1007/s10695-013-9838-y

Zuanazzi, J. S. G., de Lara, J. A. F., Goes, E. S. R., et al. (2019). Anoxia stress and its effect on flesh quality and gene expression of tilapia. *Figshare*. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7773314

Zuanazzi, J. S. G., de Lara, J. A. F., Goes, E. S. R., et al. (2018). Anoxia stress and its effect on flesh quality and gene expression of tilapia. *Figshare*. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7367948