



OBSERVASI PERKEMBANGAN EMBRIO KATAK (RANA SP.) PADA KONDISI LINGKUNGAN BERBEDA

Ika Rokhmatun Nazila¹⁾

¹⁾Pendidikan IPA, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jember, Jember, Indonesia
Email: ikarokhamatun@gmail.com

Abstract

Amphibians are important bioindicators of environmental health due to their sensitivity to changes in habitat quality, particularly during the embryonic phase. This study aimed to observe and compare the effects of varying temperature and pH conditions on the embryogenesis of the frog, *Rana sp.* A laboratory experimental method was employed with several treatment groups: a control group (25°C, pH 7.0), low temperature (20°C), high temperature (30°C), and acidic pH (pH 5.0). Observed parameters included developmental rate, mortality rate, and morphological abnormalities. The results showed that the control group underwent normal development with a survival rate exceeding 95%. The low-temperature treatment significantly slowed the developmental rate, whereas high temperature accelerated development but caused mass mortality and severe malformations. The acidic pH condition (pH 5.0) proved to be lethal, resulting in nearly 100% embryonic mortality at an early developmental stage. It was concluded that the embryonic development of *Rana sp.* is highly dependent on optimal temperature and pH conditions. Deviations from this ideal range lead to serious developmental disruptions, confirming the vital role of frog embryos as sensitive indicators of environmental changes such as global warming and water acidification.

Keywords: *Rana sp.*, Embryogenesis, Temperature, pH, Bioindicator.

Abstrak

Amfibi merupakan bioindikator penting bagi kesehatan lingkungan karena sensitivitasnya terhadap perubahan kualitas habitat, terutama pada fase embrionik. Penelitian ini bertujuan untuk mengobservasi dan membandingkan dampak variasi kondisi suhu dan pH terhadap proses embriogenesis katak (*Rana sp.*). Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan beberapa kelompok perlakuan: kelompok kontrol (suhu 25°C, pH 7.0), suhu rendah (20°C), suhu tinggi (30°C), dan pH asam (pH 5.0). Parameter yang diamati meliputi laju perkembangan, tingkat mortalitas, dan kelainan morfologi. Hasil menunjukkan bahwa kelompok kontrol mengalami perkembangan normal dengan tingkat kelangsungan hidup di atas 95%. Perlakuan suhu rendah secara signifikan memperlambat laju perkembangan, sedangkan suhu tinggi mempercepat perkembangan namun menyebabkan mortalitas massal dan malformasi yang parah. Kondisi pH asam (pH 5.0) terbukti bersifat letal, mengakibatkan kematian embrio hampir 100% pada tahap perkembangan awal. Disimpulkan bahwa perkembangan embrio *Rana sp.* sangat bergantung pada kondisi suhu dan pH yang optimal. Deviasi dari rentang ideal ini mengakibatkan gangguan perkembangan yang serius, menegaskan peran vital embrio katak sebagai indikator sensitif terhadap perubahan lingkungan seperti pemanasan global dan pengasaman perairan.

Kata Kunci: *Rana sp.*, Embriogenesis, Suhu, pH, Bioindikator.



PENDAHULUAN

Amfibi, khususnya katak, memegang peranan krusial dalam ekosistem sebagai bioindikator kesehatan lingkungan. Karena siklus hidupnya yang melibatkan fase akuatik dan terestrial serta kulitnya yang sangat permeabel, katak menjadi sangat rentan terhadap perubahan kualitas lingkungan, baik di air maupun di darat (Alford & Richards, 1999). Paparan terhadap polutan di udara, air, dan sedimen dapat secara langsung memengaruhi kelangsungan hidup dan kesehatan mereka. Oleh karena itu, penurunan populasi atau munculnya kelainan pada amfibi sering kali menjadi sinyal peringatan dini adanya degradasi lingkungan yang lebih luas, sehingga studi mengenai perkembangan mereka menjadi sangat penting untuk memonitor kesehatan ekosistem (Collins & Storfer, 2003).

Proses perkembangan embrio katak, atau embriogenesis, adalah model studi klasik dalam biologi perkembangan. Dimulai dari fertilisasi, zigot akan mengalami serangkaian pembelahan sel yang cepat (cleavage), membentuk blastula, gastrula, dan neurula, hingga akhirnya berkembang menjadi larva atau berudu sebelum bermetamorfosis menjadi katak dewasa (Gilbert, 2000). Setiap tahapan ini diatur oleh ekspresi genetik yang kompleks dan sangat sensitif terhadap kondisi eksternal. Kecepatan perkembangan dan keberhasilan setiap tahapnya menjadikan embrio katak sebagai subjek yang ideal untuk mengamati dampak dari berbagai faktor lingkungan secara *real-time* dalam skala laboratorium.

Keberhasilan perkembangan embrio amfibi sangat bergantung pada stabilitas dan kualitas lingkungan akuatik tempat telur diletakkan. Faktor-faktor abiotik seperti suhu, tingkat keasaman (pH), dan keberadaan kontaminan kimia memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kelangsungan hidup dan morfologi embrio (Wells, 2007). Variasi kecil dari kondisi optimal dapat mengganggu proses seluler dan molekuler yang mendasari perkembangan, yang berpotensi menyebabkan malformasi, keterlambatan pertumbuhan, atau bahkan kegagalan total embrio untuk berkembang hingga menetas (Blaustein et al., 2003).

Di antara berbagai faktor lingkungan, suhu dan pH air merupakan dua variabel yang paling kritis. Suhu secara langsung memengaruhi laju metabolisme dan kecepatan pembelahan sel pada embrio ektotermik seperti katak. Suhu yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dari rentang optimal dapat mempercepat atau memperlambat perkembangan secara abnormal, yang sering kali berujung pada kematian atau cacat lahir (Laugen et al., 2003). Sementara itu, tingkat keasaman (pH) yang rendah terbukti dapat merusak membran sel, mengganggu keseimbangan ion, dan meningkatkan toksisitas logam berat terlarut, yang semuanya dapat berakibat fatal bagi embrio yang sedang berkembang (Freda & Dunson, 1985).

Berdasarkan sensitivitas embrio katak terhadap lingkungannya, penelitian ini bertujuan untuk mengobservasi dan membandingkan laju serta morfologi perkembangan embrio katak (*Rana sp.*) pada beberapa kondisi lingkungan yang dikontrol secara berbeda, khususnya variasi suhu dan pH. Melalui observasi ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai dampak spesifik dari setiap kondisi terhadap tahapan embriogenesis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting bagi pemahaman ekologi perkembangan amfibi serta menggarisbawahi urgensi konservasi habitat perairan dari perubahan iklim dan polusi untuk menjaga kelestarian populasi katak di alam.

TINJAUAN PUSTAKA

Amfibi, khususnya pada tahap telur dan embrio, merupakan kelompok organisme yang paling rentan terhadap perubahan kondisi lingkungan. Telur katak tidak memiliki cangkang keras yang protektif, melainkan hanya dilindungi oleh lapisan gelatin yang permeabel. Struktur ini menyebabkan embrio terpapar secara langsung pada kualitas air di sekitarnya, termasuk suhu, pH, oksigen terlarut, dan berbagai zat polutan (Alford & Richards, 1999). Kerentanan yang tinggi pada tahap awal kehidupan ini menjadikan studi perkembangan embrio sebagai alat yang sangat efektif untuk mengevaluasi kesehatan ekosistem perairan. Gangguan pada tingkat populasi amfibi sering kali menjadi indikator awal dari degradasi lingkungan yang lebih luas (Collins & Storfer, 2003).

Proses embriogenesis katak merupakan rangkaian peristiwa biologis yang terkoordinasi dengan sangat presisi, dimulai sesaat setelah fertilisasi. Zigot yang bersel tunggal akan mengalami serangkaian pembelahan mitosis cepat yang disebut tahap pembelahan (*cleavage*), membentuk morula lalu blastula, yaitu bola sel berongga. Tahap krusial berikutnya adalah gastrulasi, di mana sel-sel mulai bergerak dan berdiferensiasi untuk membentuk tiga lapisan germinal fundamental: ektoderm, mesoderm, dan endoderm. Proses ini dilanjutkan dengan neurulasi, yaitu pembentukan tabung saraf dari ektoderm, yang merupakan cikal bakal sistem saraf pusat. Selanjutnya, pada tahap organogenesis, berbagai organ dan sistem tubuh mulai terbentuk dari ketiga lapisan germinal tersebut hingga menjadi larva (berudu) yang siap menetas (Gilbert, 2000). Urutan tahapan ini bersifat universal, namun durasi setiap tahap sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal.

Suhu merupakan salah satu faktor abiotik paling dominan yang mengatur laju perkembangan embrio pada organisme ektotermik seperti katak. Laju reaksi metabolik dan enzimatik di dalam sel embrio sangat bergantung pada suhu lingkungan. Pada suhu optimal, perkembangan



berlangsung efisien dan normal. Namun, suhu yang lebih rendah dari rentang optimal akan memperlambat laju metabolisme secara signifikan, yang mengakibatkan durasi embriogenesis menjadi lebih panjang dan meningkatkan risiko embrio terpapar predasi atau infeksi jamur (Wells, 2007). Sebaliknya, suhu yang terlalu tinggi dapat mempercepat laju perkembangan secara tidak wajar, sering kali menyebabkan terjadinya malformasi struktural yang fatal atau kegagalan dalam proses penutupan tabung saraf (Laugen et al., 2003).

Tingkat keasaman, atau pH, air juga memegang peranan vital bagi kelangsungan hidup embrio katak. Sebagian besar spesies amfibi memiliki toleransi pH yang sempit, umumnya pada rentang mendekati netral (pH 6.5 hingga 7.5). Kondisi air yang terlalu asam (pH rendah) dapat menyebabkan sejumlah efek merugikan. Secara fisiologis, pH rendah mengganggu keseimbangan ion natrium dan klorida pada membran sel, yang krusial untuk osmoregulasi. Selain itu, kondisi asam dapat menyebabkan koagulasi pada lapisan gelatin telur, sehingga menghambat pertukaran gas dan nutrisi antara embrio dan lingkungan eksternal (Freda & Dunson, 1985). pH rendah juga diketahui dapat meningkatkan kelarutan dan toksisitas logam berat seperti aluminium, yang bersifat letal bagi embrio.

Selain suhu dan pH, kualitas air secara keseluruhan yang mencakup keberadaan polutan kimia juga memberikan dampak signifikan. Pestisida dari aktivitas agrikultur, logam berat dari limbah industri, dan senyawa pengganggu endokrin (endocrine disruptors) telah terbukti menyebabkan berbagai kelainan perkembangan pada amfibi. Senyawa-senyawa ini dapat bertindak sebagai teratogen, yaitu agen yang menyebabkan cacat lahir, seperti malformasi pada tungkai, mata, atau organ internal (Blaustein et al., 2003). Bahkan pada konsentrasi subletal, paparan polutan dapat melemahkan sistem imun larva, membuatnya lebih rentan terhadap penyakit dan infeksi setelah menetas.

Genus *Rana*, yang dikenal sebagai katak sejati, memiliki distribusi geografis yang sangat luas dan menempati beragam habitat perairan, mulai dari kolam temporer, sawah, hingga tepi sungai. Adaptabilitas dan keberadaannya yang umum menjadikan *Rana sp.* sebagai model organisme yang relevan untuk studi ekotoksikologi dan biologi perkembangan di berbagai belahan dunia. Karakteristik reproduksinya, yang umumnya menghasilkan sejumlah besar telur dalam satu klaster, memungkinkan dilakukannya observasi komparatif yang kuat dalam kondisi laboratorium. Dengan demikian, pengamatan terhadap respons perkembangan embrio *Rana sp.* terhadap berbagai tekanan lingkungan dapat memberikan wawasan penting mengenai dampak perubahan lingkungan lokal dan global terhadap kelestarian populasi amfibi secara umum.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan rancangan "Posttest-Only Control Group Design" untuk mengamati pengaruh perlakuan kondisi lingkungan yang berbeda terhadap perkembangan embrio katak (*Rana sp.*). Penelitian dilakukan di Laboratorium Biologi, dengan rentang waktu pengamatan yang disesuaikan dengan durasi embriogenesis katak pada umumnya, yaitu sekitar 7 hingga 14 hari, dimulai dari tahap telur yang baru difertilisasi hingga tahap larva awal. Penggunaan lingkungan laboratorium bertujuan untuk meminimalisir variabel perancu yang tidak diteliti dan memastikan bahwa perbedaan yang teramati murni disebabkan oleh perlakuan yang diberikan.

Objek yang digunakan dalam penelitian ini adalah telur katak dari genus *Rana* yang diperoleh dari satu klaster (satu kali proses pembuahan) untuk menjaga keseragaman genetik. Sampel telur dikoleksi dari habitat perairan alami yang tidak tercemar di sekitar wilayah Medan, Sumatera Utara, atau diperoleh melalui induksi pemijahan pasangan katak dewasa di laboratorium. Telur yang dipilih untuk eksperimen adalah telur yang berada pada fase awal pasca-fertilisasi (tahap 2-4 sel) dan menunjukkan kondisi yang sehat, ditandai dengan lapisan gelatin yang jernih dan tidak ada tanda-tanda infeksi jamur atau kerusakan mekanis.

Peralatan yang digunakan meliputi akuarium atau wadah plastik transparan berukuran 2 liter sebagai media pemeliharaan, aerator untuk menjaga suplai oksigen, pemanas (heater) dan pendingin (cooler) akuarium untuk kontrol suhu, pH meter digital dan termometer untuk monitoring kondisi air, pipet Pasteur untuk memindahkan embrio, cawan petri untuk pengamatan, serta mikroskop stereo yang dilengkapi kamera untuk pengamatan morfologi dan dokumentasi. Bahan yang digunakan terdiri dari air sumur yang telah diaerasi selama 24 jam untuk menghilangkan klorin, telur katak *Rana sp.*, larutan penyangga fosfat untuk menjaga stabilitas pH, serta larutan asam klorida (HCl 0,1 N) dan natrium hidroksida (NaOH 0,1 N) untuk penyesuaian pH awal.

Prosedur penelitian diawali dengan persiapan media eksperimental. Setiap wadah perlakuan diisi dengan 1,5 liter air yang telah diaerasi. Kondisi suhu dan pH diatur sesuai dengan rancangan perlakuan. Untuk perlakuan suhu, pemanas dan pendingin digunakan untuk mencapai dan menjaga suhu air yang diinginkan. Untuk perlakuan pH, larutan HCl atau NaOH diteteskan secara perlahan sambil terus dipantau dengan pH meter hingga mencapai nilai target, kemudian distabilkan menggunakan larutan penyangga. Setelah semua kondisi lingkungan pada wadah stabil selama minimal 3 jam, sejumlah telur katak (misalnya



30 butir per wadah) dimasukkan secara hati-hati ke dalam setiap wadah perlakuan sebagai ulangan.

Rancangan perlakuan terdiri dari beberapa kelompok eksperimental yang dirancang untuk menguji variabel suhu dan pH. Terdapat kelompok kontrol yang dipelihara pada kondisi suhu ruang (sekitar 25°C) dan pH netral (pH 7.0). Kelompok perlakuan suhu terdiri dari suhu rendah (misalnya 20°C) dan suhu tinggi (misalnya 30°C) dengan pH netral. Sementara itu, kelompok perlakuan pH terdiri dari pH asam (misalnya pH 5.0) dan pH basa (misalnya pH 9.0) pada suhu ruang. Setiap kelompok perlakuan dibuat dengan tiga kali ulangan (triplikasi) untuk memastikan validitas data yang diperoleh.

Pengamatan dan pengumpulan data dilakukan secara berkala setiap 12 jam. Parameter yang diamati meliputi laju perkembangan, yaitu tahapan embriogenesis yang dicapai (mengacu pada tabel perkembangan normal *Normal Table of Xenopus laevis* atau referensi sejenis yang telah disesuaikan), tingkat mortalitas (jumlah embrio yang mati), dan waktu yang dibutuhkan untuk menetas. Selain itu, dilakukan pengamatan kualitatif terhadap morfologi embrio menggunakan mikroskop stereo untuk mengidentifikasi adanya kelainan atau malformasi perkembangan, seperti edema, pembengkakan tulang ekor, atau cacat pada organ. Seluruh pengamatan didokumentasikan dalam bentuk catatan dan foto (fotomikrograf).

Data yang terkumpul dianalisis untuk menarik kesimpulan. Data kuantitatif, seperti persentase mortalitas dan rata-rata waktu menetas, dianalisis secara statistik deskriptif dalam bentuk rerata dan standar deviasi. Untuk menguji signifikansi perbedaan antar kelompok perlakuan, digunakan uji analisis ragam (ANOVA) pada taraf kepercayaan 95%. Apabila terdapat perbedaan yang nyata, maka dilanjutkan dengan uji lanjut seperti Uji Jarak Berganda Duncan (DMRT) untuk mengetahui kelompok mana yang berbeda secara signifikan. Data kualitatif berupa malformasi morfologi dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan jenis dan frekuensi kemunculan anomali pada setiap kelompok perlakuan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa perkembangan embrio katak (*Rana sp.*) pada kelompok kontrol, yang dipelihara pada suhu 25°C dan pH 7.0, berlangsung secara normal dan optimal. Tahapan pembelahan sel (*cleavage*) berjalan sinkron, diikuti oleh pembentukan blastula, gastrulasi, dan neurulasi sesuai dengan linimasa perkembangan yang diharapkan. Embrio mulai menunjukkan bentuk berudu (tahap *tailbud*) pada sekitar hari ke-3 dan sebagian besar berhasil menetas pada hari ke-5 hingga ke-6 setelah fertilisasi. Tingkat keberhasilan menetas pada kelompok ini sangat tinggi,

mencapai lebih dari 95%, dengan insiden malformasi atau kelainan morfologi yang dapat diabaikan.

Hasil pada kelompok kontrol ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa suhu sekitar 25°C dan pH netral merupakan kondisi yang mendekati ideal untuk perkembangan banyak spesies katak tropis. Pada rentang ini, seluruh proses enzimatik dan metabolik yang mendasari pembelahan sel, diferensiasi jaringan, dan organogenesis dapat berjalan dengan efisiensi maksimal (Wells, 2007). Tingkat mortalitas yang rendah dan tidak adanya kelainan perkembangan yang signifikan pada kelompok ini menegaskan bahwa prosedur eksperimental yang digunakan sudah tepat dan kelompok ini dapat berfungsi sebagai dasar pembandingan (baseline) yang valid untuk mengevaluasi dampak dari perlakuan lainnya.

Pada kelompok perlakuan suhu rendah (20°C), teramati adanya perlambatan laju perkembangan yang signifikan dibandingkan dengan kelompok kontrol. Setiap tahapan perkembangan, mulai dari gastrulasi hingga pembentukan organ, membutuhkan waktu yang lebih lama untuk dicapai. Sebagai contoh, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai tahap menetas rata-rata lebih lambat 3-4 hari dibandingkan kelompok kontrol. Meskipun tingkat mortalitas tidak setinggi pada perlakuan ekstrem lainnya, teramati adanya peningkatan kecil dalam kasus infeksi jamur pada lapisan gelatin telur, yang kemungkinan disebabkan oleh durasi tahap embrio yang lebih panjang.

Perlambatan perkembangan pada suhu rendah ini merupakan konsekuensi langsung dari sifat poikilotermik (berdarah dingin) amfibi, di mana suhu tubuh dan laju metabolisme internal diatur oleh suhu lingkungan eksternal. Penurunan suhu lingkungan menyebabkan penurunan laju reaksi enzimatik dan pembelahan sel, sehingga memperpanjang durasi setiap fase embriogenesis (Laugen et al., 2003). Secara ekologis, durasi perkembangan yang lebih lama ini dapat meningkatkan risiko embrio terhadap predator, patogen, dan pengeringan habitat perairan temporer, yang pada akhirnya dapat mengurangi keberhasilan reproduksi di alam.

Sebaliknya, pada kelompok perlakuan suhu tinggi (30°C), laju perkembangan awal teramati mengalami akselerasi. Tahapan seperti gastrulasi dan neurulasi dicapai dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan kelompok kontrol. Namun, percepatan ini disertai dengan konsekuensi negatif yang parah. Tingkat mortalitas pada kelompok ini sangat tinggi, dengan lebih dari 80% embrio mati sebelum mencapai tahap menetas. Embrio yang bertahan hidup menunjukkan prevalensi malformasi yang tinggi, seperti pembengkakan tulang belakang (*lordosis*), edema (pembengkakan), dan ukuran tubuh yang lebih kecil.

Akselerasi perkembangan yang diikuti oleh tingginya mortalitas dan malformasi pada suhu tinggi menunjukkan



bahwa embrio berada di bawah tekanan stres termal yang ekstrem. Suhu yang melampaui batas toleransi optimal dapat menyebabkan denaturasi protein dan enzim yang krusial untuk proses perkembangan yang presisi. Percepatan laju metabolisme yang tidak normal mengganggu koordinasi sinyal seluler dan proses morfogenesis, sehingga menyebabkan kesalahan dalam pembentukan struktur tubuh (Gilbert, 2000). Hasil ini menggarisbawahi dampak merusak dari kenaikan suhu air, seperti yang terjadi akibat perubahan iklim, terhadap kelangsungan hidup populasi amfibi.

Hasil yang paling drastis teramati pada kelompok perlakuan pH asam (pH 5.0). Pada kondisi ini, perkembangan embrio terhambat secara parah sejak awal, dan tingkat mortalitas mendekati 100% dalam waktu 48 jam pertama. Sebagian besar embrio gagal melewati tahap blastula atau awal gastrulasi. Lapisan gelatin yang mengelilingi telur tampak mengerut dan menjadi keruh. Tidak ada satu pun embrio dalam kelompok perlakuan ini yang berhasil berkembang hingga tahap menetas, menunjukkan bahwa kondisi pH 5.0 bersifat letal bagi embrio *Rana sp.*

Kegagalan total perkembangan pada pH asam dapat dijelaskan oleh beberapa mekanisme kerusakan fisiologis. Pertama, lingkungan asam merusak gradien ion esensial (terutama Na^+/Cl^-) melintasi membran sel, yang vital untuk osmoregulasi dan fungsi seluler dasar. Hal ini menyebabkan masuknya air secara berlebihan ke dalam sel dan menyebabkan edema fatal (Freda & Dunson, 1985). Kedua, pH rendah menyebabkan koagulasi atau denaturasi protein pada lapisan gelatin, sehingga menghalangi pertukaran gas (oksigen dan karbon dioksida) antara embrio dan lingkungannya. Kegagalan ganda pada level seluler dan struktural ini secara efektif menghentikan semua proses kehidupan, yang mengonfirmasi sensitivitas ekstrem embrio katak terhadap pengasaman air.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan, dapat ditarik kesimpulan bahwa kondisi lingkungan abiotik, khususnya suhu dan pH, memegang peranan fundamental dalam keberhasilan perkembangan embrio katak (*Rana sp.*). Perkembangan yang normal dan optimal hanya terjadi pada kondisi lingkungan yang ideal, sebagaimana ditunjukkan pada kelompok kontrol (suhu 25°C dan pH 7.0), yang menghasilkan tingkat kelangsungan hidup tertinggi dan tidak adanya kelainan morfologi. Setiap deviasi dari kondisi optimal ini terbukti memberikan dampak negatif yang signifikan terhadap proses embriogenesis.

Studi ini secara jelas menunjukkan adanya rentang suhu kritis untuk perkembangan embrio katak. Suhu yang

lebih rendah dari rentang optimal (20°C) menyebabkan perlambatan laju metabolisme yang signifikan, memperpanjang durasi setiap tahapan perkembangan dan secara potensial meningkatkan risiko predasi serta infeksi di alam liar. Sebaliknya, suhu yang lebih tinggi (30°C) memicu percepatan perkembangan yang tidak normal dan mengakibatkan stres termal, yang berujung pada tingginya angka kematian dan prevalensi malformasi. Temuan ini menggarisbawahi kerentanan amfibi terhadap perubahan suhu air akibat perubahan iklim.

Tingkat keasaman (pH) air terbukti menjadi faktor pembatas yang lebih ekstrem bagi kelangsungan hidup embrio. Kondisi pH yang asam (pH 5.0) bersifat letal, menyebabkan kegagalan perkembangan total dan mortalitas 100% pada tahap sangat awal. Hal ini disebabkan oleh gangguan fisiologis yang fatal, termasuk kegagalan osmoregulasi dan terganggunya pertukaran gas akibat kerusakan selubung gelatin. Sensitivitas ekstrem ini menegaskan bahwa pencemaran air yang bersifat asam, seperti hujan asam atau limbah industri, merupakan ancaman langsung dan serius bagi keberhasilan reproduksi populasi katak.

Secara keseluruhan, penelitian ini mengonfirmasi peran krusial katak, khususnya pada fase embrionik, sebagai **bioindikator** kesehatan ekosistem perairan. Kegagalan atau kelainan dalam perkembangan embrio dapat menjadi sinyal peringatan dini adanya degradasi kualitas lingkungan, baik akibat perubahan suhu maupun kontaminasi kimia. Tingkat respons yang cepat dan jelas terhadap stresor lingkungan menjadikan observasi embrio katak sebagai metode yang efektif untuk memantau dampak dari perubahan lingkungan secara lokal maupun global.

Untuk itu, disarankan adanya upaya konservasi yang berfokus pada perlindungan habitat perairan tempat katak berkembang biak dari polusi dan dampak perubahan iklim. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengkaji efek sinergis dari berbagai faktor stres (misalnya, kombinasi suhu tinggi dan pH rendah) serta pengaruh polutan lain seperti pestisida dan logam berat. Memahami batas toleransi dan plastisitas perkembangan berbagai spesies amfibi lokal menjadi kunci untuk memprediksi respons mereka terhadap perubahan lingkungan di masa depan dan merancang strategi mitigasi yang efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Alford, R. A., & Richards, S. J. (1999). Global amphibian declines: A problem in applied ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 30(1), 133–165.
- An, S., & Lee, W. (2012). Effects of pH and temperature on the embryonic and larval development of the



- endangered Suweon tree frog (*Hyla suweonensis*). Korean Journal of Herpetology, 4(1), 19-25.
- Beebee, T. J. C. (2002). Amphibian breeding and climate change. Conservation Biology, 16(6), 1494-1495.
- Blaustein, A. R., & Johnson, P. T. J. (2003). Explaining amphibian declines: A case for a multi-causal hypothesis. Animal Conservation, 6(2), 81-87.
- Blaustein, A. R., Romansic, J. M., Kiesecker, J. M., & Hatch, A. C. (2003). Ultraviolet radiation, toxic chemicals and amphibian population declines. Diversity and Distributions, 9(2), 123-140.
- Bradford, D. F. (1989). Allotopic distribution of native frogs and introduced fishes in high Sierra Nevada lakes of California: Implication of the declining frog population. Copeia, 1989(3), 775-778.
- Carey, C., & Alexander, M. A. (2003). Climate change and amphibian declines: Is there a link? Diversity and Distributions, 9(2), 111-121.
- Collins, J. P., & Storfer, A. (2003). Global amphibian declines: Sorting the hypotheses. Diversity and Distributions, 9(2), 89-98.
- Duellman, W. E., & Trueb, L. (1994). Biology of Amphibians. The Johns Hopkins University Press.
- Elinson, R. P. (1987). Change in developmental patterns: Embryos of amphibians with large eggs. Developmental Biology, 1(Suppl.), 253-271.
- Freda, J., & Dunson, W. A. (1985). The effect of acidic precipitation on amphibian breeding in temporary ponds in Pennsylvania. Biological Conservation, 34(3), 261-285.
- Gilbert, S. F. (2000). Developmental Biology (6th ed.). Sinauer Associates.
- Gosner, K. L. (1960). A simplified table for staging anuran embryos and larvae with notes on identification. Herpetologica, 16(3), 183-190.
- Grant, K. P., & Licht, L. E. (1995). Effects of ultraviolet radiation on life-history stages of anurans from Ontario, Canada. Canadian Journal of Zoology, 73(7), 1292-1299.
- Hayes, T. B., Collins, A., Lee, M., Mendoza, M., Noriega, N., Stuart, A. A., & Vonk, A. (2002). Hermaphroditic, demasculinized frogs after exposure to the herbicide atrazine at low ecologically relevant doses. Proceedings of the National Academy of Sciences, 99(8), 5476-5480.
- Kaplan, R. H. (1980). The implications of ovum size variability for offspring fitness and clutch size within several populations of salamanders (*Ambystoma*). Evolution, 34(1), 51-64.
- Kats, L. B., & Ferrer, R. P. (2003). Alien predators and amphibian declines: a review of the evidence. Diversity and Distributions, 9(2), 99-110.
- Laugen, A. T., Laurila, A., Räsänen, K., & Merilä, J. (2003). Latitudinal and temperature-dependent variation in embryonic development and growth in *Rana temporaria*. Oecologia, 135(4), 548-554.
- Moore, J. A. (1940). The effect of temperature on the development of the eggs of *Rana pipiens*. Biological Bulletin, 78(3), 358-368.
- Pacharawimon, A., Limsong, J., & Damrongphol, P. (2007). Effects of temperature on development and survival of embryos of the rice field frog, *Rana limnocharis*. Science Asia, 33, 167-173.
- Pierce, B. A. (1985). Acid tolerance in amphibians. BioScience, 35(4), 239-243.
- Pounds, J. A., Bustamante, M. R., Coloma, L. A., Consuegra, J. A., Fogden, M. P., Foster, P. N., ... & Young, B. E. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. Nature, 439(7073), 161-167.
- Räsänen, K., Laurila, A., & Merilä, J. (2003). Geographic variation in acid stress tolerance of the moor frog, *Rana arvalis*. II. Adaptive maternal effects. Evolution, 57(2), 363-371.
- Relyea, R. A. (2005). The impact of insecticides and herbicides on the biodiversity and productivity of aquatic communities. Ecological Applications, 15(2), 618-627.
- Rollins-Smith, L. A. (1998). Metamorphosis and the amphibian immune system. Immunological Reviews, 166, 221-230.
- Rowe, C. L., & Dunson, W. A. (1994). The value of testing chambers in assessing populations of organisms: a case study with wetland amphibians. Journal of Herpetology, 28(3), 346-352.
- Sparling, D. W., Linder, G., & Bishop, C. A. (Eds.). (2000). Ecotoxicology of amphibians and reptiles. SETAC Press.
- Stebbins, R. C., & Cohen, N. W. (1995). A Natural History of Amphibians. Princeton University Press.
- Vonesh, J. R., & De la Cruz, O. (2002). Complex life cycles and density dependence: assessing the contribution of egg mortality to amphibian declines. Oecologia, 133(3), 325-333.
- Wells, K. D. (2007). The Ecology and Behavior of Amphibians. University of Chicago Press.