

Review Tentang Kemampuan Ikan Ekstremofil Untuk Hidup Di Perairan Asam Dan Terkontaminasi Logam Berat Pascapenambangan Timah

Andri Kurniawan^{1*} dan Diah Mustikasari²

¹Jurusan Akuakultur, Fakultas Pertanian, Perikanan, dan Biologi, Universitas Bangka Belitung;

²Jurusan Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, International Women University

ABSTRAK

Ikan ekstremofil (*extremophile fishes*) telah muncul sebagai model untuk kajian biologi integratif. Ikan-ikan ini tidak hanya memberikan wawasan tentang proses biologis, biokimia, fisiologis, dan perkembangan kehidupan organisme, tetapi juga penjelasan tentang kapasitas dan keterbatasan hidup untuk beradaptasi dan bertahan hidup dalam kondisi lingkungan ekstrem. Beberapa ikan ekstremofil dapat bertahan hidup di bawah kondisi habitat yang dianggap tidak ramah bagi sebagian besar ikan karena adanya stresor lingkungan. Ikan ekstrofil sering mengembangkan mekanisme adaptasi yang kompleks untuk mengatasi faktor stresor. Salah satu lingkungan yang ekstrim adalah kolong bekas penambangan timah yang terletak di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung sebagai penghasil timah. Beberapa ikan yang ditemukan dapat beradaptasi dengan kondisi ekstrem habitat ini; pH rendah, oksigen terlarut rendah, nutrisi rendah, dan kontaminasi logam berat tinggi. Habitat ekstrem yang terjadi secara alami dapat dianggap sebagai penelitian evolusioner yang memungkinkan mempelajari kemampuan ikan untuk beradaptasi dan bertahan hidup terhadap kondisi ekologi yang berubah. Telaah artikel ini bertujuan untuk memberikan gambaran tentang karakteristik perairan kolong bekas penambangan timah dan fisiologi ikan ekstremofil ditinjau dari modifikasi fisikokimia dan biokimianya. Hasil kajian makalah penelitian menunjukkan beberapa jenis ikan seperti *Aplocheilus* sp., *Betta* sp., *Gambusia* sp., *Rasbora* sp., *Belontia* sp., *Brevibora* sp., *Oryzias* sp., *Puntius* sp., *Anabas* sp., dan *Trichogaster* sp. mampu toleran pada kondisi ekstrem perairan kolong pascapenambangan timah yang terbengkalai. Kemampuan ikan untuk beradaptasi dan bertahan hidup di lingkungan ekstrem seperti perairan kolong pascapenambangan timah didukung oleh kemampuan untuk melakukan penundaan penetasan telur dengan memasuki fase diapause. Kemampuan ikan lainnya adalah pengaturan mekanisme osmoregulasi atau homeostatis tubuh terhadap kondisi pH asam maupun kontaminasi logam berat di lingkungan tersebut.

Kata kunci: kolong pascapenambangan timah, air asam, mekanisme adaptasi, ikan ekstremofil, logam berat

ABSTRACT

Extremophile fishes have emerged as veritable models for investigations in integrative biology. These fishes not only provide insights into biological, biochemical, physiological, and developmental processes of organism' life, but also the explanation of life's capacity and limitation to adapt and survive in the extreme environmental conditions. Some extremophile fishes can survive under habitat conditions considered inhospitable for most fishes due to the presence of the environment stressors. The extremophile fishes have often evolved complex adaptation mechanisms to cope the stressor factors. One of the extreme environments is abandoned tin mining ponds, located in Bangka Belitung Archipelago Province as a tin producer. Some fishes have found can adapt to the extreme conditions of this habitat; low pH, low dissolved oxygen, low nutrition, and highly heavy metals contamination. Naturally occurring extreme habitat can be regarded as evolutionary researches that allow studying the ability of fishes to adapt and survive to altered ecological conditions. This paper review aimed to provide an overview about water characteristics of abandoned tin mining pits and physiology of extremophile fishes in terms of modification of physicochemical and biochemical. The result of research papers review indicated some species of fish such as *Aplocheilus* sp., *Betta* sp., *Gambusia* sp., *Rasbora* sp., *Belontia* sp., *Brevibora* sp., *Oryzias* sp., *Puntius* sp., *Anabas* sp., and *Trichogaster* sp. able to tolerate to the extreme conditions of abandoned tin mining pit waters. The ability of fish to adapt and survive in extreme environments such as abandoned tin mining pit waters is supported by the ability to delay hatching of eggs by entering the diapause phase. Another ability is the regulation of the body's osmoregulation or homeostatic mechanism against acidic pH conditions and heavy metal contamination in the environment.

Keywords: abandoned tin mining pits, acid waters, adaptation mechanisms, extremophile fishes, heavy metals

Citation: Kurniawan, A., dan Mustikasari, D. (2021). Review tentang Kemampuan Ikan Ekstremofil untuk Hidup di Perairan Asam dan Terkontaminasi Logam Berat Pascapenambangan Timah. Jurnal Ilmu Lingkungan, 19(3), 541-554, doi:10.14710/jil.19.3.541-554

* Penulis Korespondensi: andri_pangkal@yahoo.co.id

1. Pendahuluan

Provinsi Kepulauan Bangka Belitung terletak di sabuk timah Asia Tenggara (*Southeast Asia tin belt*) (Sudiyani et al. 2011) merupakan penghasil timah terbesar kedua di dunia setelah China (Syarbaini et al. 2014). Kegiatan penambangan mineral timah telah dilakukan sejak 1668 (Irawan et al. 2014) yang dilakukan dengan sistem kolong terbuka (*open-pit mining system*). Penambangan sistem *open-pit system* ini dapat menghasilkan perairan tertutup yang disebut kolong (Sukarman dan Gani, 2017; Sukarman et al. 2020).

Kolong (*pit*) merupakan lubang menyerupai kolam (*pond*) atau danau (*lake*) sebagai hasil penggalian tanah di dalam proses penambangan atau ekstraksi mineral timah yang berisi air. Air yang kolong umumnya berwarna coklat (keruh), hijau, atau biru sehingga sangat sedikit hewan air yang mampu hidup di perairan tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa air di kolong tersebut berkualitas buruk untuk kehidupan organisme akuatik (Asriani dan Kurniawan, 2015; Sukarman et al. 2020).

Kondisi perairan kolong pascatambang timah secara umum dapat memiliki pH bersifat asam, yaitu mencapai $\text{pH} < 3$, oksigen terlarut rendah, dan terkontaminasi logam berat (Hashim et al. 2018; Kurniawan et al. 2019). Kondisi air asam, hipoksik, dan cemaran logam berat atau logam toksik ini dapat menjadi faktor tekanan lingkungan ekstrem yang serius bagi kehidupan organisme (Thompson et al. 2017; Igiri et al. 2018).

Sejumlah ikan telah dilaporkan ditemukan pada perairan pascatambang timah seperti ikan kepala timah (*Aplocheilichthys* sp.), tempala (*Betta* sp.), cere (*Gambusia* sp.), seluang (*Rasbora* sp.), selinca (*Belontia* sp.), berenet (*Brevibora* sp.), mata tiga (*Oryzias* sp.), kemuring (*Puntius* sp.), betok (*Anabas* sp.) dan sepat rawa (*Trichogaster* sp.) (Kurniawan dan Kurniawan, 2012; Kurniawan et al. 2020). Keberadaan sejumlah ikan yang dikelompokkan sebagai ikan ekstremofil (*extremophile fishes*) (Riesch et al. 2015) yang dapat beradaptasi dan hidup di lingkungan perairan ekstrem pascatambang timah perlu mendapatkan fokus di dalam kajian ilmiah. Keberadaan organisme akuatik tersebut mendorong kajian ini, yaitu berupa telaah artikel terkait fisiologi dan mekanisme adaptasi dari ikan-ikan ekstremofil tersebut sehingga dapat dimanfaatkan untuk kajian lanjutan yang lebih implementatif seperti manajemen kualitas air kolong pascatambang timah, akuakultur, atau pemanfaatan sumber daya air lainnya. Telaah atau review artikel tentang kemampuan ikan ekstremofil untuk hidup di perairan asam dan terkontaminasi logam berat pascapenambangan timah bertujuan untuk mengelaborasi berbagai informasi terkait deskripsi organisme ekstremofil, karakteristik lingkungan dan ikan-ikan yang ditemukan di perairan pascatambang timah, serta mekanisme adaptasi dari ikan ekstremofil dari lingkungan ekstrem yang diharapkan dapat

merepresentasikan kapasitas ikan-ikan yang hidup di perairan pascatambang timah.

2. Organisme Ekstremofil

Para ilmuwan selama beberapa dekade terakhir sangat tertarik mempelajari kelompok organisme yang menghuni lingkungan ekstrem yang dikenal sebagai ekstremofil (*extremophile*).

Istilah ekstremofil berasal dari Bahasa Latin, yaitu *extremus* yang menandakan superlatif dari luar kebiasaan (*exter* atau *being on the outside*) atau dapat berarti ekstrem (*extreme*) dan Bahasa Yunani, yaitu *philos* yang berarti cinta (*love*). Ekstremofil pertama kali diperkenalkan oleh Macelroy pada tahun 1974 sebagai organisme yang menyenangkan kondisi ekstrem yang dikelompokkan ke dalam domain archaea, bakteri, dan eukariota (Rothschild dan Mancinelli, 2001; Gupta et al. 2014). Oarga (2009) menerangkan bahwa menurut Kristjansson dan Hreggvidsson (1995) ekstremofil adalah organisme yang mampu hidup dan berkembang melampaui parameter lingkungan normal pada umumnya.

Organisme ini tumbuh dengan baik atau optimum di habitat yang bagi organisme lainnya merupakan lingkungan ekstrem yang menghambat aktivitas biologi atau bahkan mematikan. Lingkungan ekstrem tersebut dapat berupa suhu yang sangat panas atau dingin, larutan garam yang tinggi, kondisi pH asam atau basa ekstrem, cemaran limbah beracun dan logam berat, atau habitat lainnya yang tidak cocok bagi kehidupan normal organisme umumnya (Rampelotto, 2013; Gupta et al. 2014).

Ekstremofil dapat dibedakan menjadi dua kelompok utama, yaitu organisme ekstremofil yang membutuhkan satu atau lebih kondisi ekstrem yang mendukung pertumbuhannya dan organisme ekstremotoleran yang dapat toleran pada kondisi ekstrem satu atau lebih parameter fisikokimia dan kemudian tumbuh optimum pada kondisi normal (Rampelotto, 2013; Martínez-Espinosa, 2020; Swathi dan Sravanti, 2020).

Organisme ekstremofil yang selama ini banyak dikaji adalah mikroorganisme, yaitu bakteri dan archaea. Kelompok ini mampu mengembangkan kemampuan adaptasi genetik dan metabolismenya terhadap lingkungan yang tidak kondusif bagi pertumbuhannya. Kelompok ekstremofil lainnya yang juga sudah mulai banyak dikaji adalah kelompok eukariota seperti protista berupa algae, fungi, dan protozoa serta organisme multiseluler (Rampelotto, 2013; Arora dan Panosyan, 2019). Klasifikasi dan tipe kelompok ekstremofil yang didasarkan pada kondisi suhu, radiasi, tekanan, gravitasi, vakum, kekeringan, salinitas, pH, oksigen, dan bahan kimia ditampilkan pada Tabel 1 (Rothschild dan Mancinelli, 2001).

Beberapa parameter lingkungan yang banyak mendapat perhatian di dalam penelitian terkait ekstremofile adalah suhu, pH, oksigen, dan cemaran bahan kimia.

a. Ekstrem suhu

Suhu adalah parameter yang penting untuk kehidupan suatu organisme. Kondisi ekstrem bagi organisme terjadi pada suhu lebih tinggi atau lebih rendah dari suhu normalnya.

Kelompok eukariot secara umum memiliki batas atas toleransi kehidupan sekitar 60 °C dan sejumlah tanaman berpembuluh memiliki suhu maksimum 48 °C, sedangkan ikan pada suhu 40 °C (Magan, 2007). Namun, sejumlah organisme lainnya mampu hidup pada kondisi ekstrem, yaitu hipertermofilik yang memiliki suhu pertumbuhan maksimum > 80 °C dan psikrofilik < 15 °C (Prieur, 2007; Rothschild dan Mancinelli, 2001), bahkan kelompok bakteri memiliki suhu terendah untuk aktif pada -18 °C (Oarga, 2009).

b. Ekstrem pH

Lingkungan pH ekstrem umumnya didefinisikan sebagai kondisi lingkungan yang bersifat asam dengan pH < 3 atau bersifat basa dengan pH > 9 (Amaral-Zettler, 2013). Kondisi pH ekstrem dapat mengganggu metabolisme organisme secara umum, kecuali organisme asidofilik dan alkalifil (Rothschild dan Mancinelli, 2001). Kondisi asam dapat menjadi lingkungan yang optimum bagi kehidupan asidofil (Baker-Austin and Dopson 2007) dan demikian juga kondisi basa dapat menjadi lingkungan optimum bagi kehidupan alkalifil atau alkalofil (Ulukanli dan Digrak, 2002).

Nilai pH lingkungan merupakan faktor penting di dalam identifikasi asidofilik sehingga asidofilik dikelompokkan menjadi dua, yaitu kelompok *true acidophile* (*extreme acidophiles*) dan *moderate acidophiles*. *True acidophiles* (*extreme acidophiles*) dapat hidup pada pH 2,7 dan bahkan beberapa dapat hidup pada pH < 1,0 dengan pH optimum pertumbuhan < 3,0. *Moderate acidophiles* mampu hidup pada rentang pH yang lebih luas, yaitu 3,0-7,2 dengan pH optimum pertumbuhan 3,0-5,0 (Johnson dan Hallberg, 2008; Mendez et al. 2008; Oren, 2010).

Organisme alkalifil dikelompokkan menjadi dua, yaitu alkalifil (*alkaliphiles*) dan alkalitoleran (*alkalitolerants*) (Ulukanli dan Digrak, 2002; Othoinoyi dan Ibraheem, 2015) dengan pH optimum alkalifil > 9 atau sering antara pH 10,0 and pH 12,0 (Grum-Grzhimaylo et al. 2013; Gupta et al. 2014; Horikoshi, 2016).

c. Ekstrem oksigen

Oksigen adalah salah satu elemen penting yang menentukan keberadaan kehidupan organisme, khususnya eukariotik di planet ini (Stamati et al. 2011) di dalam proses metabolismenya. Kebutuhan oksigen bagi suatu organisme dapat menentukan karakteristik organisme tersebut, yaitu melakukan metabolisme secara aerobik (membutuhkan oksigen dalam jumlah banyak) ataukah anaerobik (membutuhkan oksigen dalam jumlah sedikit) (Gupta et al. 2009; Jiang et al. 2012; Toro dan Pinto, 2015).

Tabel 1 Klasifikasi dan contoh organisme berdasarkan tipe kehidupannya

Environmental parameter	Type	Definition	Examples
Temperature	Hyperthermophile	Growth > 80 °C	<i>Pyrolobus fumarii</i> , 113 °C
	Thermophile	Growth 60–80 °C	<i>Synechococcus lividus</i>
	Mesophile	15–60 °C	<i>Homo sapiens</i>
	Psychrophile	< 15 °C	<i>Psychrobacter</i> , some insects
Radiation			<i>Deinococcus radiodurans</i>
Pressure	Barophile/Piezophile	Weight-loving	Unknown
		Pressure-loving	For microbe, 130 MPa
Gravity	Hypergravity	> 1 <i>g</i>	None known
	Hypogravity	< 1 <i>g</i>	None known
Vacuum		Tolerates vacuum (space devoid of matter)	Tardigrades, insects, microbes, seeds
Desiccation	Xerophiles	Anhydrobiotic	<i>Artemia salina</i> ; nematodes, microbes, fungi, lichens
Salinity	Halophile	Salt-loving (2–5 M NaCl)	Halobacteriaceae, <i>Dunaliella salina</i>
pH	Alkaliphile	pH > 9	<i>Natronobacterium</i> , <i>Bacillus firmus</i> OF4, <i>Spirulina</i> spp. (all pH 10.5)
	Acidophile	low pH-loving	<i>Cyanidium caldarium</i> , <i>Ferroplasma</i> sp. (both pH 0)
Oxygentension	Anaerobe	Cannot tolerate O ₂	<i>Methanococcus jannaschii</i>
	Microaerophile	Tolerates some O ₂	<i>Clostridium</i>
	Aerobe	Requires O ₂	<i>H. sapiens</i>
Chemical extremes	Gases	Can tolerate high concentrations of metal	<i>C. caldarium</i> (pure CO ₂)
	Metals	(metalotolerant)	<i>Ferroplasma acidarmanus</i> (Cu, As, Cd, Zn); <i>Ralstonia</i> sp. CH34 (Zn, Co, Cd, Hg, Pb)

Sumber: Rothschild dan Mancinelli (2001).

Kondisi lingkungan anaerobik memiliki karakteristik hipoksia (*hypoxia*), yaitu lingkungan yang memiliki konsentrasi oksigen di bawah 2 mg.L^{-1} serta karakteristik anoksia (*anoxia*) yang secara absolut tidak ada oksigen (Riesch et al. 2015; Toro dan Pinto, 2015).

Organisme aerobik obligat membutuhkan keberadaan konsentrasi oksigen di lingkungannya sekitar 20% untuk pertumbuhan optimal. Organisme mikroaerofil (*microaerophiles*) dapat tumbuh dengan optimal pada konsentrasi oksigen di bawah konsentrasi normal tersebut. Kelompok mikroaerofil tersebut dapat bersifat (1) anaerob fakultatif (*facultative anaerobes*) yang mampu berrespirasi secara aerob, namun menggunakan alternatif penerima elektron terminal untuk respirasi anaerobik ataupun tumbuh melalui proses fermentasi; (2) anaerob aerotoleran (*aerotolerant anaerobes*) yang toleran terhadap keberadaan oksigen, tetapi tidak memperoleh energi dari respirasi aerob serta tumbuh optimum tanpa adanya oksigen; (3) anaerob obligat (*obligate anaerobes*) yang tidak mampu mentoleransi keberadaan oksigen dan hidup hanya pada kondisi anaerob atau anoksik (Morris dan Schmid, 2013).

d. Ekstrem cemaran bahan kimia

Sejumlah organisme dapat mentoleransi dan hidup pada lingkungan yang mengandung cemaran logam berat dalam konsentrasi tinggi yang disebut metalofil (*metallophiles*) atau metalotoleran (*metallotolerants*) (Sinha et al. 2014; Othinoiyi dan Ibraheem, 2015). Metalofil memiliki kemampuan untuk resisten pada konsentrasi logam berat yang

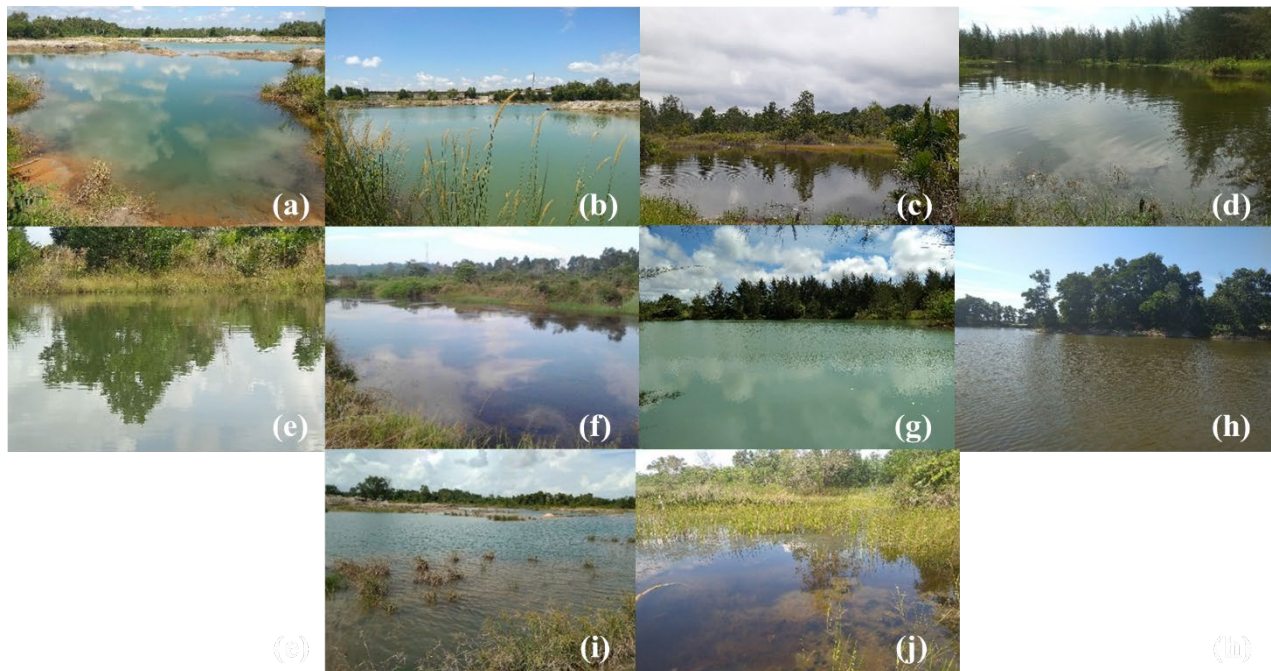
tinggi seperti Cd, Cr, Co, Cu, Ag, Ni, Pb, Ta, Zn, dan sebagainya (Mergeay, 2006; Barman et al. 2020).

3. Lingkungan Perairan Pascatambang Timah

Mustikasari et al. (2020a) telah mengeksplorasi sejumlah kolong pascapenambangan timah pada rentang umur berbeda, yaitu < 5 tahun hingga > 100 tahun. Visualisasi kolong pascapenambangan timah ditampilkan pada Gambar 1.

Lingkungan perairan pascapenambangan di awal pembentukan perairan tersebut bersifat asam yang dikenal dengan istilah *acid mine drainage* (AMD) atau air asam tambang (AAT) (Kurniawan, 2019). Sifat asam di perairan tambang merupakan hasil proses oksidasi mineral sulfida yang terdapat di bebatuan, tanah, maupun sedimen sebagai *potential acid forming* (PAF) seperti kalkopirit, pirit, galena, dan sphalerite (Bigham dan Nordstrom, 2000; Tan et al. 2007; Celebi dan Oncel, 2016).

Berbagai penelitian di area pascapenambangan timah menunjukkan bahwa terdapat sejumlah logam seperti Pb, Zn, Mn, Fe, Cr, Cu, Ni, Cd, Sn, dan sebagainya (Ashraf et al. 2011; Ashraf et al. 2012; Henny, 2011; Rosidah dan Henny, 2012; Daniel et al. 2014; Kurniawan, 2020). Keberadaan unsur-unsur tersebut secara langsung maupun tidak langsung dapat mempengaruhi nilai pH (De Saedeleer et al. 2010; Zhao et al. 2010; Fernandes et al. 2011; Strom et al. 2011; Huang et al. 2012; Sadeghi et al. 2012; Zhang et al. 2014). Sejumlah logam berat dan bentuk oksida dari logam berat di perairan pascatambang timah yang ditinggalkan ditunjukkan pada Tabel 1 (Kurniawan, 2020).

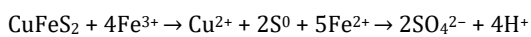


Gambar 1 Kolong Pascapenambangan Timah di Pulau Bangka: Stasiun A (a) dan Stasiun B (b) Berumur < 5 tahun; Stasiun C (c) dan Stasiun D (d) Berumur 5-15 tahun; Stasiun E (e) dan Stasiun F (f) Berumur (15-25 tahun); Stasiun G (g) Berumur 25-50 tahun; Stasiun H (h) Berumur 50-100 tahun; Stasiun I (i) dan Stasiun J (j) Berumur > 100 tahun (Mustikasari et al. 2020a)

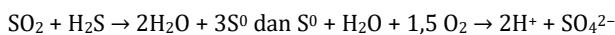
Tabel 1. Jenis dan bentuk oksida logam berat yang ditemukan di perairan pascatambang timah

Metal form	Metal oxide form	Name of oxide form	Average metal oxide concentration in the research stations (ppm)		
			A	B	C
As	As ₂ O ₃	Arsenic (III) oxide	5.7	8.49	3.04
Co	Co ₂ O ₃	Cobalt (III) oxide	14.2	ND	9.34
Cr	Cr ₂ O ₃	Chromium (III) oxide	13.8	14.5	1.96
Cu	CuO	Cupric (II) oxide	7.03	7.83	6.91
Fe	Fe ₂ O ₃	Iron (III) oxide	1424.3	2307.67	1571.93
Ga	Ga ₂ O ₃	Gallium (III) oxide	11.5	12	12.65
Hf	HfO ₂	Hafnium (IV) oxide	7.74	8.76	11.07
Mn	MnO	Manganese (II) oxide	33.7	35.1	39.05
Ni	NiO	Nickel (II) oxide	10.4	7.32	4.64
Pb	PbO	Lead (II) oxide	14.5	13	9.4
Sn	SnO ₂	Tin (IV) oxide	89.73	64.77	74.53
Ta	Ta ₂ O ₅	Tantalum (V) oxide	987.33	1373.33	888.73
Te	TeO ₂	Tellurium (II) oxide	13	9.48	14.5
Th	ThO ₂	Thorium (II) oxide	10.5	9.97	15.75
V	V ₂ O ₅	Vanadium (V) oxide	3	ND	2.38
Zn	ZnO	Zinc oxide	3	ND	ND

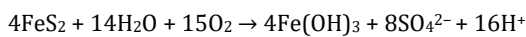
Unsur-unsur tersebut mengalami proses oksidasi sehingga menghasilkan produk akhir berupa kation dan ion H⁺ seperti beberapa contoh reaksi kimia berikut (Gonzalez-Toril et al. 2006; Mejia et al. 2009; Heidel dan Tichomirowa, 2011; Dopson dan Johnson, 2012).



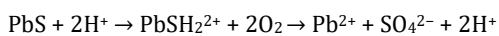
atau



atau



atau



Ion H⁺ yang semakin banyak di suatu lingkungan menyebabkan kondisi pH di lingkungan tersebut semakin asam (Gaikwad dan Gupta, 2008; Hatar et al. 2013).

Kualitas perairan pascapenambangan timah yang dipandang ekstrem adalah kondisi pH bersifat asam yang dapat mencapai pH < 3 (Kurniawan et al. 2019) dan bahkan dapat mencapai pH 1,7 (Kurniawan, 2017) serta cemaran logam berat (Kurniawan, 2020; Mustikasari et al. 2020a).

Nilai pH dan cemaran logam berat menjadi bagian penting di dalam studi terkait kemampuan organisme akuatik, khususnya ikan yang dapat beradaptasi dan hidup di lingkungan ekstrem tersebut. Hal ini dikarenakan pH ekstrem dan cemaran logam berat dapat berimplikasi langsung terhadap aktivitas biologis ikan maupun berdampak secara tidak langsung melalui perubahan mikroekosistem di lingkungan tersebut (Prosser et al. 2007). Konsekuensi logis dari perubahan mikroekosistem tersebut menyebabkan perubahan struktur, fungsi, dinamika, dan diversitas mikroorganisme serta mempengaruhi

siklus biogeokimiawi di habitat tersebut (Niemi dan McDonald, 2004; Moscatelli et al. 2005; Claassens et al. 2008; Lozupone dan Knight, 2008; Bhowal dan Chakraborty, 2015; Fashola et al. 2015; Kurniawan, 2016).

4. Ikan Ekstremofil (*Extremophile Fishes*)

Perairan pascapenambangan timah pada awal ditinggalkan dari aktivitas penambangan dengan sudah ditemukan sejumlah ikan. Jenis ikan yang ditemukan di awal perairan tersebut ditinggalkan cenderung lebih banyak termasuk ikan-ikan berukuran kecil seperti kepala timah (*Aplocheilus* sp.), tempala (*Betta* sp.), cere (*Gambusia* sp.), seluang (*Rasbora* sp.), selinca (*Belontia* sp.), berenet (*Brevibora* sp.), mata tiga (*Oryzias* sp.), kemuring (*Puntius* sp.), betok (*Anabas* sp.) dan sepat rawa (*Trichogaster* sp.) (Kurniawan dan Kurniawan, 2012; Kurniawan et al. 2020). Spesies-spesies tersebut mengindikasikan kemampuannya beradaptasi dan survive di lingkungan perairan ekstrem kolong pascapenambangan timah, terutama pada kondisi asam dan tercemar logam berat.

Beberapa jenis dari ikan-ikan yang ditemukan di perairan kolong pascapenambangan timah tersebut, yaitu *Aplocheilus* sp., *Gambusia* sp., *Poecilia* sp., dan *Rasbora* sp. adalah jenis *extremophile fishes* yang telah banyak dipublikasi (Riesch et al. 2015; Riesch et al. 2016). *Aplocheilus* sp. berasal dari Familia Aplocheilidae (Mustikasari et al. 2020b), *Rasbora* sp. berasal dari Familia Danionidae (Sholihah et al. 2020), *Gambusia* sp. dan *Poecilia* sp. dari Familia Poeciliidae (Casner et al. 2016; Nuryanto et al. 2016). Ketiga familia tersebut menunjukkan *Aplocheilus* sp., *Gambusia* sp., *Poecilia* sp. dikelompokkan ke dalam Ordo Cyprinodontiformes, sedangkan *Rasbora* sp. dimasukkan ke dalam Ordo Cypriniformes.

Kondisi pH asam di kolong pascapenambangan timah akibat oksidasi mineral sulfida menjadi faktor

pembatas bagi kehidupan organisme akuatik. Kondisi tersebut menyebabkan hanya sedikit organisme akuatik yang mampu beradaptasi pada lingkungan perairan asam (Culumber et al. 2016). Nilai pH asam juga berkaitan erat dengan nilai potensial redoks (Eh) yang menunjukkan proses reduksi oksidasi dan aktivitas ion hidrogen (H⁺) atau proton (Huang, 2016). Nilai Eh yang semakin tinggi menunjukkan aktivitas oksidasi, sedangkan nilai Eh rendah menunjukkan aktivitas reduksi (Naudet et al. 2004). Proses oksidasi dan reduksi tersebut sangat erat kaitannya dengan keberadaan logam berat di kolong pascapenambangan timah (Kurniawan 2020).

Tekanan pH asam berimplikasi pada supresi respirasi aerob yang juga berdampak pada hipoksia ekstrem di lingkungan akuatik tersebut (Riesch et al. 2016). Lingkungan ekstrem rendah oksigen dapat menyebabkan keberadaan organisme lainnya rendah. Hal ini berdampak pada rendahnya ketersediaan dan kualitas bahan organik maupun pakan bagi ikan. Kondisi ini juga menjadi stessor lingkungan yang menyebabkan sedikitnya organisme akuatik yang mampu hidup di lingkungan ekstrem (Passow et al. 2017).

Extremophile fishes menjadi model biologi untuk mempelajari terkait proses biokimia, fisiologis, dan perkembangan yang mengatur kehidupan, serta kapasitas untuk beradaptasi dengan kondisi lingkungan ekstrem (Tobler et al. 2015). Sejumlah penelitian telah menjelaskan berbagai mekanisme adaptasi dari *extremophile fishes* seperti kelompok ikan dari Ordo Cyprinodontiformes.

a. Mekanisme adaptasi telur

Ikan dari Ordo Cyprinodontiformes sering dikenal dengan sebutan *killifishes*, memiliki siklus hidup tahunan (Furness, 2015) yang umumnya dapat hidup di daerah intertidal (perairan yang dipengaruhi oleh aliran air atau pasang surut) ataupun habitat epemeral (Turko dan Wright, 2015).

Ikan *killifishes* dikelompokkan menjadi dua, yaitu *annual* dan *non-annual killifishes*. Ikan *killifishes* mampu beradaptasi pada lingkungan ekstrem seperti kekeringan karena mampu mengadaptasikan telurnya mengalami fase istirahat (diapause) pada tahap perkembangan embrionya (Garcia et al. 2008). Selaput permukaan telur atau *chorion* dibuat menebal sehingga mampu bertahan pada kondisi kekurangan air (Dominguez-Castanedo et al. 2013).

Embriogenesis ikan yang mengalami fase diapause terjadi dalam tiga tahapan, yaitu diapause I, diapause II, dan diapause III. Diapause merupakan suatu fase peristirahatan perkembangan telur yang terjadi secara alami ketika suatu organisme berada di suatu kondisi musiman atau ekstrem. Fase diapause I dapat terjadi sebelum gastrulasi dan pembentukan sumbu embrionik, yaitu sel-sel yang nantinya membentuk embrio mengalami penyebaran ke seluruh permukaan kuning telur. Diapause II dapat terjadi sekitar pertengahan perkembangan setelah inisiasi neurulasi dan segmentasi, tetapi sebelum fase utama

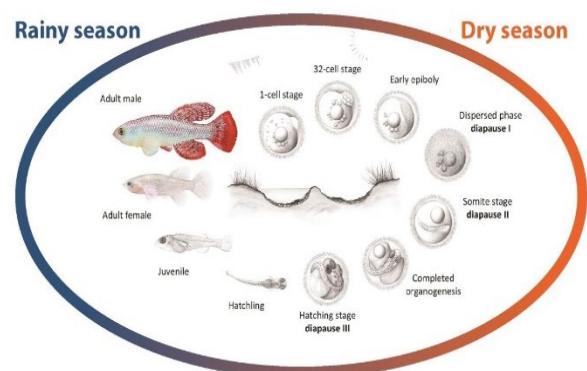
organogenesis. Embrio Diapause II biasanya memiliki komplemen somit yang hampir lengkap, dasar dari sistem saraf pusat dan sistem sensorik, dan jantung tubular fungsional. Diapause III dapat terjadi pada embrio pra-penetasan akhir setelah perkembangan pada dasarnya selesai. Setiap tahap diapause secara fisiologis berbeda dan dapat dipengaruhi oleh kemampuan organisme dalam menghadapi tekanan atau kondisi lingkungannya (Furness, 2015; Podrabsky dan Hand, 2015).

Embriogenesis *annual killifishes* dan *non-annual killifishes* memiliki sedikit perbedaan. Embriogenesis ikan *annual killifish* mengalami fase diapause I, diapause II, dan diapause III (Gambar 2) (Naumann dan Englert, 2018), sedangkan *non-annual killifishes* tidak mengalami diapause II.

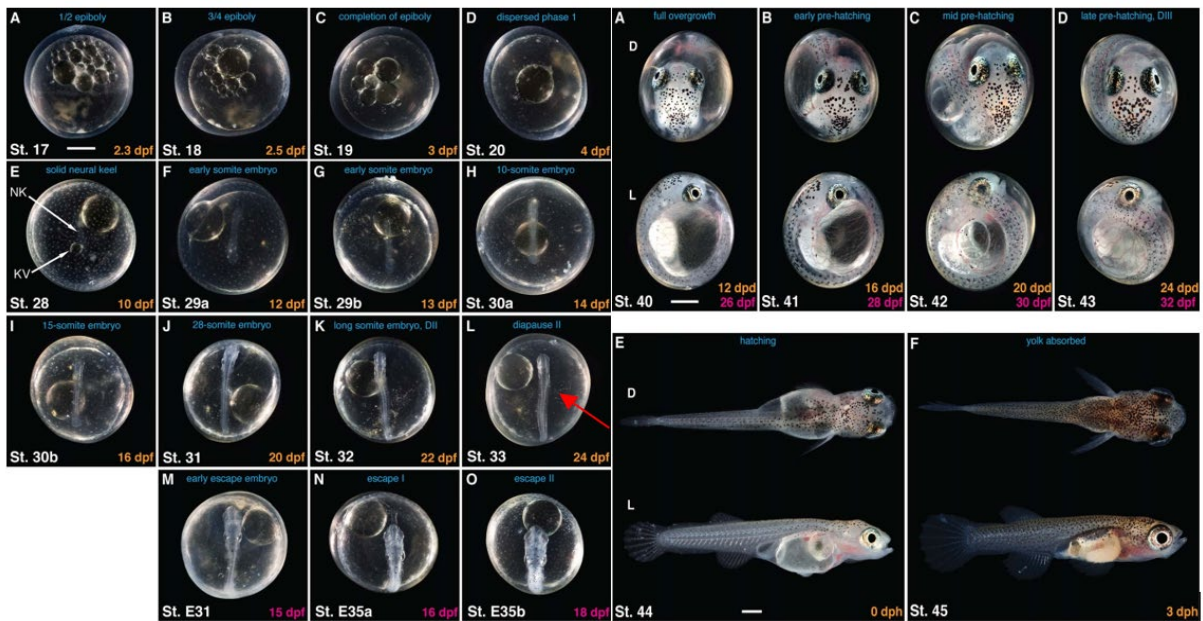
Diapause I terjadi pada fase terdispersi, diapause II terjadi pada tahap somit awal, dan diapause III terjadi sesaat sebelum menetas (Naumann dan Englert, 2018) dan perkembangan embrio ikan *annual killifish* ditampilkan pada Gambar 3 (Podrabsky et al. 2017) dan Gambar 4 (Podrabsky dan Hand, 2015).

Embrio ikan *annual killifish* dapat mengalami dormansi bulanan hingga tahunan (Dolfi et al. 2014). Kelompok *non-annual killifishes*, meskipun tidak mengalami fase diapause khususnya pada diapause II, namun tetap mengalami penundaan penetasan (*delayed hatching*) untuk jangka waktu harian, mingguan, hingga bulanan (Berois et al. 2014; Furness, 2015; Furness et al. 2018).

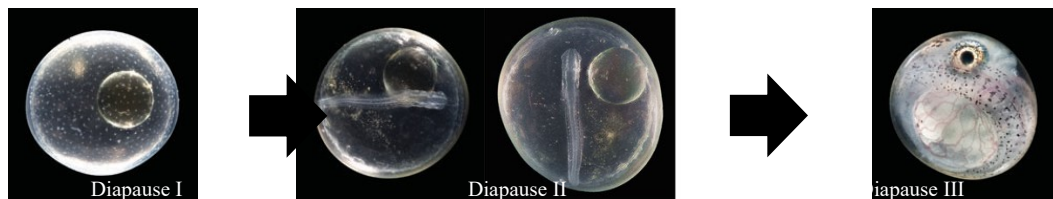
Pembelahan sel telur *non-annual killifish* dan *annual killifish* juga menunjukkan perbedaan. Kondisi ini terlihat pada Gambar 5 yang menjelaskan fase pembelahan sel setelah terjadinya fertilisasi (*cleavage*) pada kedua tipe ikan tersebut mulai dari pembelahan 2 sel hingga 32 sel. Salah satu perkembangan sel telur yang diamati dari kelompok ikan *non-annual killifish* adalah *Aplocheilus lineatus*. Perbedaan yang terlihat dari perkembangan sel telur tersebut adalah pembelahan sel dari kelompok *non-annual killifish* lebih cepat dibandingkan *annual killifish* (Dolfi et al. 2014).



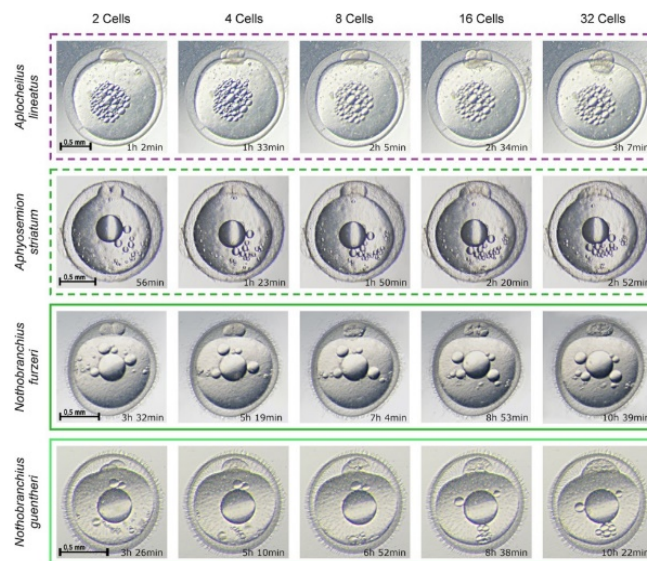
Gambar 2 Perkembangan Embrio *Annual Killifish* (Naumann dan Englert, 2018).



Gambar 3 Embriologi *Annual Killifish* (Podrabsky et al. 2017). Tanda Panah Merah Menunjukkan Tahapan Diapause II Yang Tidak Dialami *Non-Annual Killifish* (Furness, 2015).



Gambar 4 Fase Diapause I, Diapause II, Dan Diapause II Pada *Annual Killifish* (Podrabsky dan Hand, 2015; Polacik dan Podrabsky, 2015).

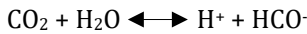


Gambar 5 Perkembangan Sel *Non-Annual Species* (Dashed Boxes) Dibandingkan Dengan *Annual Species* (Solid Boxes) (Dolfi et al. 2014).

b. Mekanisme adaptasi individu ekstremofil

Studi fisiologis telah menjelaskan bahwa ikan air tawar memiliki mekanisme transpor ion untuk menjaga homeostatis ion di dalam tubuh terhadap lingkungan ekstrem seperti pH asam. Ikan harus mempertahankan homeostatis pH intra- dan ekstraseluler dengan menggunakan strategi yang berbeda dari hewan darat untuk pengaturan zat asam-basa yang relevan.

Ikan memanfaatkan strategi paralel buffering dan ekskresi untuk bertahan melawan perubahan pH intra dan ekstraseluler. Proses metabolisme seluler menghasilkan senyawa asam secara langsung dengan menghasilkan H⁺ bebas dan secara tidak langsung melalui produksi CO₂. CO₂ pada gilirannya dapat dikonversi menjadi H⁺ dan HCO₃⁻ seperti yang dijelaskan oleh persamaan Henderson-Hasselbalch (Claiborne et al. 2002).

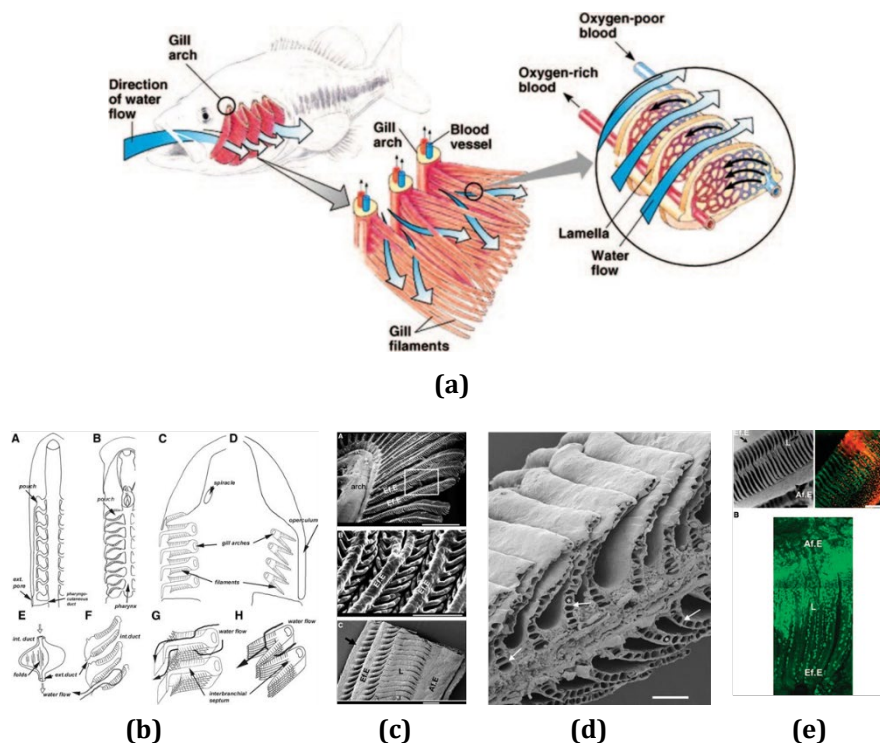


Regulasi keseimbangan asam-basa pada ikan dapat terjadi melalui pengaturan ion-ion yang relevan seperti H⁺ dan HCO₃⁻ dengan transfer branchial. Oleh karena tekanan parsial plasma CO₂ (P_{CO2}) dan konsentrasi bikarbonat rendah yang menunjukkan kapasitas buffer rendah, ikan tidak dapat menyesuaikan pH plasma dengan memodulasi ventilasi atau ekskresi CO₂ seefektif organisme yang tidak tinggal di air. Kondisi pH plasma pada ikan harus disesuaikan dengan ekskresi diferensial H⁺ atau HCO₃⁻ ke air oleh insang (Hwang et al. 2011).

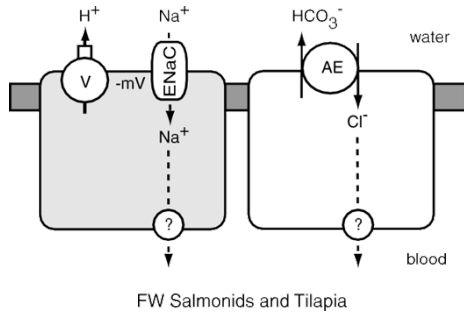
Pertukaran ion melalui peristiwa homeostatis dilakukan untuk mencegah pengasaman plasma dan kehilangan Na⁺. Kemampuan ini terutama disebabkan oleh sel klorida atau sel mitokondrion-rich (MR) atau ionosit (*ionocytes*) dari insang yang tersusun di dalam struktur folikel dan mengandung Na⁺-K-ATPase dengan konsentrasi tinggi, anhidrase karbonat II, Na⁺/H⁺ exchanger tipe 3 (NHE3), kotransporter Na⁺-HCO₃⁻ tipe 1, dan aquaporin-3 yang semuanya berfungsi pada kondisi asam (Hirata et al. 2003; Hwang et al. 2011; Daurte et al. 2013).

Sel mitokondrion-rich di epitel insang ikan teleostei adalah tempat utama regulasi ion. Sel ini bertanggung jawab atas sekresi maupun penyerapan ion berlebih dari cairan tubuh pada ikan yang beradaptasi lingkungannya (Hiroi et al. 2005). Skema insang pada ikan teleostei yang ditampilkan pada Gambar 6 menjelaskan gambaran insang dan distribusi sel mitokondrion-rich (Evans et al. 2005).

Mekanisme pertukaran ion banyak terjadi melalui insang sehingga insang menjadi organ yang sangat penting bagi ikan untuk mengatur keseimbangan ion-ion di dalam tubuhnya (Evans et al. 2005). Mekanisme penyerapan ion pertama kali dicetuskan oleh August Krogh tahun 1930s, yang menemukan bahwa terjadi pertukaran ion Na dan Cl pada ikan air tawar dan terdapat peranan ion darah seperti NH₄⁺, H⁺, dan HCO₃⁻ yang berfungsi sebagai ion pembalik (*counterions*) untuk menjaga netralitas elektron yang melintasi jaringan epitel insang dan kulit (Evans, 2010).



Gambar 6 Insang Ikan Teleostei (a), Bagian Insang (b), Filamen Insang (c), Potongan Melintang Filamen Insang (d), Distribusi Sel mitokondrion-rich (Evans et al. 2005).



FW Salmonids and Tilapia

Gambar 7 Mekanisme Pertukaran NaCl pada Ikan Air Tawar (Evans et al. 2005).

Pertukaran ion Na^+/H^+ atau $\text{Na}^+/\text{NH}_4^+$ maupun $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ didukung oleh $\text{Na}^+/\text{K}^+(\text{NH}_4^+)\text{-ATPase}$, Na^+/H^+ exchanger (NHE), dan $\text{V-H}^+\text{-ATPase}$ yang terdapat pada filamen maupun bransial epitelium insang ikan. Mekanisme pertukaran ion NaCl pada ikan air tawar ditunjukkan pada Gambar 7 (Evans et al. 2005).

Mekanisme pertukaran ion juga didukung oleh permeabilitas pada bransial epitel. Hal ini terlihat pada pekanisme penyerapan Ca_2 di seluruh epitel insang teleostei air tawar. Ca_2 digambarkan di dalam saluran Ca_2 (ECaC) pada permukaan apikal mitochondrion-rich dan diekstrusi melintasi membran basolateral melalui $\text{Ca}_2\text{-ATPase}$ (PMCA) atau penukar Na^+/Ca_2 (NCE) (Gambar 8) (Evans et al. 2005).

Na^+/H^+ exchanger (NHE) juga telah dikaji menjadi salah satu variabel yang mendukung mekanisme pertukaran ion di dalam tubuh ikan. Model mekanisme sekresi asam dan penyerapan Na^+ pada mitochondrion-rich insang ikan air tawar ditunjukkan pada Gambar 9 (Evans et al. 2005).

Mekanisme fisikokimia tersebut menjadi model untuk kajian kemampuan ikan extremofil dapat beradaptasi dan hidup pada lingkungan ekstrem seperti kondisi asam dan termasuk cemaran logam berat. Mekanisme biokimia juga terjadi di dalam proses adaptasi pada lingkungan ekstrem.

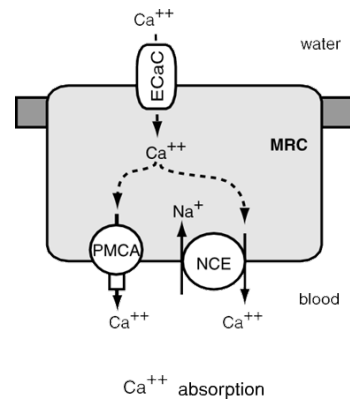
Metallothionein (MTs) adalah protein kecil, kaya asam amino sistein, pengikat logam berat yang ditemukan di semua organisme, baik prokariot maupun eukariot. Berbagai penelitian menunjukkan peranan MTs dalam berbagai proses intraseluler. Mitochondria adalah pusat produksi energi utama di banyak sel eukariotik dan mengakomodasi banyak proses metabolisme, salah satunya fosforilasi oksidatif yang paling sering dikaitkan dengan peranan organel ini (Lindique et al. 2010; Liu et al. 2014).

Metallothionein berperan dalam homeostasis logam karena MTs memiliki afinitas yang kuat terhadap logam sehingga berperan penting dalam regulasi logam dalam tubuh (Lindique et al. 2010). Logam-logam yang terikat pada MTs diatur agar tidak mengganggu metabolisme tubuh. Ketika tubuh mengalami kondisi logam berat berlebih. Hal ini dikarenakan afinitas MTs untuk logam berat lebih kuat sehingga MTs dapat berperan di dalam proses

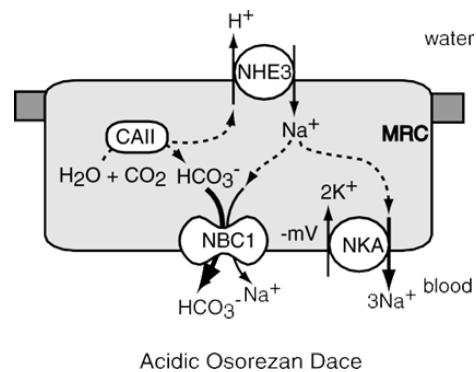
homeostatis dan detoksifikasi logam berat Liu et al. 2014; Wang et al. 2014] yang melindungi tubuh dari sitotoksitas logam berat (Sabolic et al. 2010).

Protein MTs juga efektif mengumpulkan radikal bebas dari spesies oksigen reaktif (*reactive oxygen species-ROS*) dan spesies nitrogen reaktif (*reactive nitrogen species-RNS*) seperti hidrogen peroksida, superoksida, oksida nitrat (NO^-), hidroksil (OH^-), peroksinitrit (ONOO^-) (Ruttkay-Nedecky et al. 2013). Hal ini menunjukkan bahwa MTs tidak hanya berperan sebagai homeostatis logam di dalam tubuh maupun pengantar potensial ion logam untuk enzim tertentu dalam mitochondria, tetapi juga memiliki kemampuan untuk berfungsi sebagai pengikat radikal bebas ROS (Lindique et al. 2010).

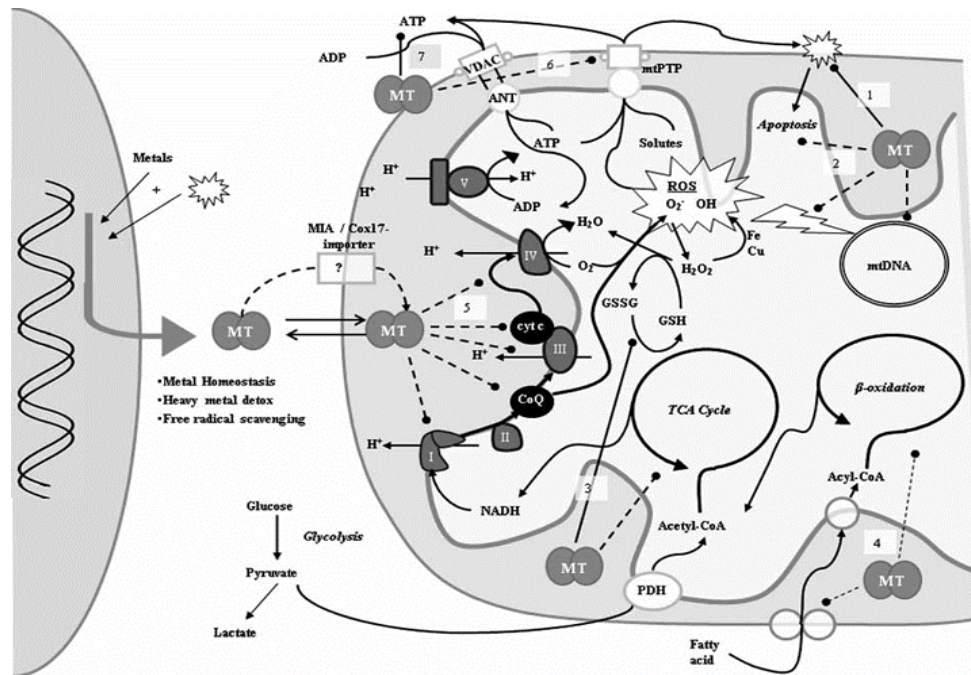
Penelitian lainnya menjelaskan tentang kontribusi MTs untuk mengurangi proses apoptosis, yaitu peristiwa pemusnahan sel di dalam tubuh organisme multiseluler. Aktivitas pengaturan MTs terhadap proses apoptosis hanya terjadi kondisi kerusakan sel diekspresikan secara berlebihan. Hal ini menunjukkan bahwa MTs tidak menghentikan apoptosis sepenuhnya, melainkan mengurangnya ke tingkat yang sama dalam situasi normal. Skematis pengaturan keseimbangan logam berat oleh MTs ditampilkan pada Gambar 10 (Lindique et al. 2010).



Gambar 8 Mekanisme Pertukaran Ca pada Ikan Air Tawar (Evans et al. 2005).



Gambar 9 Model Sekresi Asam dan Absorpsi Na^+ pada Mitochondrion-Rich Insang Ikan Air Tawar (Evans et al. 2005).



Gambar 10 Rangkuman presentasi skema dari interaksi diduga MTs dengan mitokondria. MTs melindungi mitokondria dan mtDNA terhadap ROS (1) dan apoptosis (2). MT-glutathione redoks dan siklus pertukaran logam dan keterlibatan dalam regulasi enzim (3). Metallothionein knockout menunjukkan keterlibatan dengan metabolisme lipid (4). Interaksi MTs dengan ETC (5) dan pori transisi (6). Sekuestrasi MTs dari ATP (7). Sit c, sitokrom c; PDH, piruvat dehidrogenase; TCA, asam trikarboksilat. Garis putus-putus menunjukkan interaksi dan jalur tidak langsung atau tidak pasti (Lindique et al. 2010).

5. Kesimpulan

Sejumlah ikan ditemukan di perairan kolong pascapenambangan timah yang pada umur tertentu setelah ditinggalkan memiliki kondisi pH ekstrem dan tercemar logam berat. Penelitian yang spesifik menjelaskan tentang kemampuan ikan untuk bertahan di perairan kolong pascapenambangan timah belum ditemukan. Namun, pendekatan kajian pustaka terhadap ikan-ikan yang hidup di perairan ekstrem (*extremophile fishes*) lainnya menjadi dasar terbentuknya suatu hipotesis dan tesis bahwa ikan-ikan tersebut diduga mengembangkan sejumlah mekanisme adaptasi dan survival. Mekanisme tersebut dapat berupa penundaan penetasan telur, yaitu fase diapause yang menyebabkan telur mengalami penundaan penetasan hingga tahunan. Mekanisme lainnya adalah pengaturan homeostatis atau keseimbangan ion pembentuk pH asam dan logam berat di dalam tubuhnya melalui pertukaran ion Na^+/H^+ atau $\text{Na}^+/\text{NH}_4^+$ maupun $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ didukung oleh $\text{Na}^+/\text{K}^+(\text{NH}_4^+)\text{-ATPase}$, Na^+/H^+ exchanger (NHE), $\text{V-H}^+\text{-ATPase}$, hingga protein metallothionein (MTs).

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Bangka Belitung atas dukungan berupa

bantuan biaya publikasi melalui RKAKL Jurusan Akuakultur tahun 2021.

DAFTAR PUSTAKA

Amaral-Zettler, L.A. 2013. Eukaryotic diversity at pH extremes. *Frontiers in Microbiology* 3(441): 1-17

Arora, N.K., Panosyan, H. 2019. Extremophiles: applications and roles in environmental sustainability. *Environmental Sustainability* 2(2019): 217-218

Ashraf MA, Maah MJ, Yusoff I. 2011. Heavy metals accumulation in plants growing in ex tin mining catchment. *International Journal of Environmental Science and Technology* 8(2): 401-416

Ashraf MA, Maah MJ, Yusoff I. 2012. Speciation of heavy metals in the sediments of former tin mining catchment. *Iranian Journal of Science and Technology* 36(A2): 163-180

Asriani, E., Kurniawan, A. 2015. Determinasi nilai pH untuk memprediksi kualitas perairan pada kolong pascatambang timah di Pulau Bangka. *Journal of Aquatropica Asia* 1(2): 1-10

Baker-Austin, C., Dopson, M. 2007. Life in acid: pH homeostasis in acidophiles. *Trends in Microbiology* 15(4): 165-171

Barman, D., Jha, D.K., Bhattacharjee, K., Singh, R.P., Manchanda, G., Maurya, I.K., Wei, Y. 2020. Metallo-tolerant bacteria: insights into bacteria thriving in metal-contaminated areas. *Microbial versatility in*

- varied environments: microbes in sensitive environments*. Springer. Singapore, 135-64
- Berois, N., Arezo, M.J., De Sa, R.O. 2014. The Neotropical Genus *Austrolebias*: an emerging model of annual killifishes. *Cell & Developmental Biology* 3(2): 1000136
- Bhowal, S.S., Chakraborty, R. 2015. Microbial diversity of acidophilic heterotrophic bacteria: an overview. *Biodiversity, Conservation and Sustainable Development*. Ed.: Prithwiraj Jha. New Academic Publishers, New Delhi, 2015. ISBN: 9788186772751
- Bigham, J.M., Nordstrom, D.K. 2000. Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry* 40(1): 351-403
- Casner, A.M., Fackelman, H.C., Degtyareva, O., Kight, S.L. 2016. Do female western mosquitofish, *Gambusia affinis*, prefer ornaments that males lack?. *Ethology* 122(7): 561-570
- Celebi, E.E., Oncel, M.S. 2016. Determination of acid forming potential of massive sulfide minerals and the tailings situated in lead/zinc mining district of Balya (NW Turkey). *Journal of African Earth Sciences* 2016(124): 487-496
- Claassens, S., Van Rensburg, P.J.J., Maboeta, M.S., Van Rensburg, L. 2008. Soil microbial community function and structure in a post-mining chronosequence. *Water, Air, & Soil Pollution* 194(1-4): 315-329
- Claiborne, J.B., Edwards, S.L., Morrison-Shetlar, A.I. 2002. Acid-base regulation in fishes: cellular and molecular mechanisms. *Journal of Experimental Zoology* 293(3): 302-319
- Culumber, Z.W., Hopper, G.W., Barts, N., Passow, C.N., Morgan, S., Brown, A., ..., Tobler, M. 2016. Habitat use by two extremophile, highly endemic, and critically endangered fish species (*Gambusia eurystoma* and *Poecilia sulphuraria*; Poeciliidae). *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 26(6): 1155-1167
- Daniel, V.N., Chudusu, E.S., Chup, J.A., Pius, N.D. 2014. Variations of heavy metals in agricultural soils irrigated with tin water in Heipang District of Barkin Ladi, Plateau State, Nigeria. *International Journal of Science and Technology* 3(5): 255-263
- De Saedeleer, V., Cappuyens, V., De Cooman, W., Swennen, R. 2010. Influence of major elements on heavy metal composition of river sediments. *Geologica Belgica* 13(3): 257-268
- Dolfi, L., Ripa, R., Cellerino A. 2014. Transition to annual life history coincides with reduction in cell cycle speed during early cleavage in three independent clades of annual killifish. *EvoDevo* 5(32): 1-9
- Dominguez-Castanedo, O., Mosqueda-Cabrera, M.A., Valdesalici, S. 2013. First observations of annualism in *Millerichthys robustus* (Cyprinodontiformes: Rivulidae). *Ichthyological Exploration of Freshwaters* 24(1): 15-20
- Dopson, M., Johnson, D.B. 2012. Biodiversity, metabolism and applications of acidophilic sulfur-metabolizing microorganisms. *Environmental Microbiology* 14(10): 2620-2631
- Duarte, R.M., Ferreira, M.S., Wood, C.M., Val, A.L. 2013. Effect of low pH exposure on Na⁺ regulation in two cichlid fish species of the Amazon. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* 166(3): 441-448
- Evans, D.H. 2011. Freshwater fish gill ion transport: August Krogh to morpholinos and microprobes. *Acta Physiologica* 202(3): 349-359
- Evans, D.H., Piermarini, P.M., Choe, K.P. 2005. The multifunctional fish gill: dominant site of gas exchange, osmoregulation, acid-base regulation, and excretion of nitrogenous waste. *Physiological Reviews* 85(1): 97-177
- Fashola, M.O., Ngole-Jeme, V.M., Babalola, O.O. 2015. Diversity of acidophilic bacteria and archaea and their roles in bioremediation of acid mine drainage. *British Microbiology Research Journal* 8(3): 443-456
- Fernandes, L., Nayak, G.N., Ilangovan, D., Borole, D.V. 2011. Accumulation of sediment, organic matter and trace metals with space and time, in a creek along Mumbai coast, India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 91(3): 388-399
- Furness, A.I. 2015. The evolution of an annual life cycle in killifish: adaptation to ephemeral aquatic environments through embryonic diapause. *Biological Reviews* 91(3): 796-812
- Furness, A.I., Reznick, D.N., Tatarenkov, A., Avise, J.C. 2018. The evolution of diapause in Rivulus (Laimosemion). *Zoological Journal of the Linnean Society* 2018(20): 1-18
- Gaikwad, R.W., Gupta, D.V. 2008. Review on removal of heavy metals from acid mine drainage. *Applied Ecology and Environmental Research* 6(3): 81-98
- Garcia, D., Loureiro, M., Tassino, B. 2008. Reproductive behavior in the annual fish *Austrolebias reicherti* Loureiro & Garcia 2004 (Cyprinodontiformes: Rivulidae). *Neotropical Ichthyology* 6(2): 243-248
- Gonzalez-Toril, E., Gomez, F., Malki, M., Amils, R. 2006. The Isolation and study of acidophilic microorganisms. In *Methods in Microbiology* Vol. 35: 471-510. Academic Press
- Grum-Grzhimaylo, A.A., Georgieva, M.L., Debets, A.J., Bilanenko, E.N. 2013. Are alkalitolerant fungi of the *Emericellopsis* lineage (Bionectriaceae) of marine origin?. *IMA Fungus* 4(2): 213-228
- Gupta, G.N., Srivastava, S., Khare, S.K., Prakash, V. 2014. Extremophiles: an overview of microorganism from extreme environment. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology* 7(2): 371-380
- Gupta, K.J., Zabalza, A., Van Dongen, J.T. 2009. Regulation of respiration when the oxygen availability changes. *Physiologia Plantarum* 137(4): 383-391
- Hashim, M., Nayan, N., Saleh, Y., Mahat, H., Shiang, W. F. 2018. Water quality assessment of former tin mining lakes for recreational purposes in Ipoh City, Perak, Malaysia. *Indonesian Journal of Geography* 50(1): 25-33
- Hatar, H., Rahim, S.A., Razi, W.M., Sahrani, F.K. 2013. Heavy metals content in acid mine drainage at abandoned and active mining area. In *AIP Conference Proceedings* Vol. 1571, No. 1: 641-646. AIP
- Heidel, C., Tichomirowa, M. 2011. Galena oxidation investigations on oxygen and sulphur isotopes. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 47(2): 169-188
- Henny C. 2011. Bioakumulasi beberapa logam pada ikan di kolong bekas tambang timah di Pulau Bangka. *Limnotek* 18(1): 83-95
- Hirata, T., Kaneko, T., Ono, T., Nakazato, T., Furukawa, N., Hasegawa, S., ..., Hirose, S. 2003. Mechanism of acid

- adaptation of a fish living in a pH 3.5 lake. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 284(5): R1199-R1212
- Hiroi, J., McCormick, S.D., Ohtani-Kaneko, R., Kaneko, T. 2005. Functional classification of mitochondrion-rich cells in euryhaline Mozambique tilapia (*Oreochromis mossambicus*) embryos, by means of triple immunofluorescence staining for Na⁺/K⁺-ATPase, Na⁺/K⁺/2Cl⁻-cotransporter and CFTR anion channel. *Journal of Experimental Biology* 208(11): 2023-2036
- Horikoshi, K. 2016. Alkaliphiles. In *Extremophiles*: 53-78. Springer
- Huang HH. 2016. The Eh-pH diagram and its advances. *Metals* 6(23): 1-30
- Huang, J.Z., Ge, X., Wang, D. 2012. Distribution of heavy metals in the water column, suspended particulate matters and the sediment under hydrodynamic conditions using an annular flume. *Journal Environmental Science* 24(12): 2051-2019
- Hwang, P.P., Lee, T.H., Lin, L.Y. 2011. Ion regulation in fish gills: recent progress in the cellular and molecular mechanisms. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 301(1): R28-R47
- Igiri, B.E., Okoduwa, S.I., Idoko, G.O., Akabuogu, E.P., Adeyi, A.O., Ejiogu, I.K. 2018. Toxicity and bioremediation of heavy metals contaminated ecosystem from tannery wastewater: a review. *Journal of Toxicology* 2018: 1-16
- Irawan RR, Sumarwan U, Suhardjo B, Djohar S. 2014. Strategic model of tin mining industry in Indonesia (case study of Bangka Belitung Province). *International Journal of Business and Management Review* 2(3): 48-58
- Jiang, Y.Y., Kong, D.X., Qin, T., Li, X., Caetano-Anolles, G., Zhang, H.Y. 2012. The impact of oxygen on metabolic evolution: a chemoinformatic investigation. *PLoS Computational Biology* 8(3): e1002426
- Johnson D.B., Hallberg K.B. 2008. Carbon, iron and sulfur metabolism in acidophilic micro-organisms. *Advances in Microbial Physiology* 54(2008): 201-255
- Kurniawan A. 2016. Microorganism communities response of ecological changes in post tin mining ponds. *Journal of Microbiology and Virology* 6(1): 17-26
- Kurniawan, A. 2017. Chronosequence effect of post tin mining ponds to metals residu and microecosystem change. *Omni-Akuatika* 13(1): 60-65
- Kurniawan A. 2019. Diversitas metagenom bakteri di danau pascatambang timah dengan umur berbeda. [Disertasi]. Fakultas Biologi. Universitas Jenderal Soedirman. 103p
- Kurniawan, A. 2020. The metal oxides of abandoned tin mining pit waters as an indicator for bacterial diversity. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation Bioflux* 13(5): 2982-2992
- Kurniawan, A., Kurniawan, A. 2012. Analisis variasi genetik ikan di kolong pascatambang timah dengan metode elektroforesis. *Akuatik: Jurnal Sumberdaya Perairan* 6(2): 6-10
- Kurniawan, A., Oedjijono., Tamad., Sulaeman, U. 2019. The pattern of heavy metals distribution in time chronosequence of ex-tin mining ponds in Bangka Regency, Indonesia. *Indonesian Journal of Chemistry* 19(1): 254-261
- Kurniawan, A., Prasetyono, E., Syaputra, D. 2020. Analisis korelasi parameter kualitas perairan kolong pascatambang timah dengan umur berbeda. *Samakia: Jurnal Ilmu Perikanan* 11(2): 91-100
- Lindeque, J.Z., Levanets, O., Louw, R., Van Der Westhuizen, F.H. 2010. The involvement of metallothioneins in mitochondrial function and disease. *Current Protein and Peptide Science* 11(4): 292-309
- Lindeque, J.Z., Levanets, O., Louw, R., Van Der Westhuizen, F.H. 2010. The involvement of metallothioneins in mitochondrial function and disease. *Current Protein and Peptide Science* 11(4): 292-309
- Lindeque, J.Z., Levanets, O., Louw, R., Van Der Westhuizen, F.H. 2010. The involvement of metallothioneins in mitochondrial function and disease. *Current Protein and Peptide Science* 11(4): 292-309
- Liu, Y., Wu, H., Kou, L., Liu, X., Zhang, J., Guo, Y., Ma, E. 2014. Two metallothionein genes in *Oxya chinensis*: molecular characteristics, expression patterns and roles in heavy metal stress. *PLoS ONE* 9(11): e112759
- Lozupone, C.A., Knight, R. 2008. Species divergence and the measurement of microbial diversity. *FEMS Microbiology Reviews* 32(4): 557-578
- Magan N., 2007. Fungi in Extreme Environments. In: *Kubicek C.P. and Druzhinina I.S. (Eds.) Environmental and Microbial Relationships, 2nd Edition, The Micota IV*. Springer-Verlag, Berlin, 85-100
- Martinez-Espinosa, R.M. 2020. Microorganisms and their metabolic capabilities in the context of the biogeochemical nitrogen cycle at extreme environments. *International Journal of Molecular Sciences* 21(12): 1-19
- Mejia, E.R., Ospina, J.D., Marquez, M.A., Morales, A.L. 2009. Oxidation of chalcopyrite (CuFeS₂) by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and a mixed culture of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* like bacterium in shake flasks. In *Advanced Materials Research* 2009(71-73): 385-388. Trans Tech Publications. Switzerland
- Mendez, M.O., Neilson, J.W., Maier, R.M. 2008. Characterization of a bacterial community in an abandoned semiarid lead-zinc mine tailing site. *Applied and Environmental Microbiology* 74(12): 3899-3907
- Mergeay, M. 2006. Metallophiles and acidophiles in metal-rich environments, p 1-19. *Extremophiles (life under extreme environmental conditions) in Encyclopedia of life support systems (EOLSS)*. EOLSS Publishers, Oxford, United Kingdom
- Morris, R.L., Schmidt, T.M. 2013. Shallow breathing: bacterial life at low O₂. *Nature Reviews Microbiology* 11(3): 205-212
- Moscattelli, M.C., Lagomarsino, A., Marinari, S., De Angelis, P., Grego, S. 2005. Soil microbial indices as bioindicators of environmental changes in a poplar plantation. *Ecological Indicators* 5(3): 171-179
- Mustikasari, D., Suryaningsih, S., Nuryanto, A. 2020a. Morphological variation of blue panchax (*Aplocheilichthys panchax*) lives in different habitat assessed using truss morphometric. *Biosaintifika: Journal of Biology & Biology Education* 12(3): 399-407
- Mustikasari, D., Nuryanto, A., Suryaningsih, S. 2020b. The presence of blue panchax (*Aplocheilichthys panchax*) in the waters, contaminated by heavy metals, of the abandoned tin mining pits of different age. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation Bioflux* 13(5): 2538-2550
- Naudet, V., Revil, A., Rizzo, E., Bottero, J.Y., Begassat, P. 2004. Groundwater redox conditions and conductivity in a

- contaminant plume from geoelectrical investigations. *Hydrology and Earth System Sciences* 8(1): 8-22
- Naumann, B., Englert, C. 2018. Dispersion/reaggregation in early development of annual killifishes: phylogenetic distribution and evolutionary significance of a unique feature. *Developmental Biology* 442(1): 69-79
- Niemi, G.J., McDonald, M.E. 2004. Application of ecological indicators. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 35(2004): 89-111
- Nuryanto, A., Bhagawati, D., Abulias, M.N., Indarmawan, I. 2016. Ichthyofauna at Cijalu River, Cilacap Regency Central Java Province, Indonesia. *BIOTROPIA-The Southeast Asian Journal of Tropical Biology* 23(1): 1-9
- Oarga, A. (2009). Life in extreme environments. *Revista de Biologia e ciencias da Terra* 9(1): 1-10
- Oren, A. 2010. Acidophiles - version 2.0. In: *Encyclopedia of Life Sciences (ELS)*. John Wiley & Sons. Chichester. 14p
- Otohinoyi, D.A., Omodele, I. 2015. Prospecting microbial extremophiles as valuable resources of biomolecules for biotechnological applications. *International Journal of Science and Research* 4(1): 1042-1059
- Passow, C.N., Arias-Rodriguez, L., Tobler, M. 2017. Convergent evolution of reduced energy demands in extremophile fish. *PLOS ONE* 12(10): e0186935
- Podrabsky, J.E., Hand, S.C. 2015. Physiological strategies during animal diapause: lessons from brine shrimp and annual killifish. *Journal of Experimental Biology* 218(12): 1897-1906
- Podrabsky, J.E., Riggs, C.L., Romney, A.L., Woll, S.C., Wagner, J.T., Culpepper, K.M., Cleaver, T.G. 2017. Embryonic development of the annual killifish *Austrofundulus limnaeus*: an emerging model for ecological and evolutionary developmental biology research and instruction. *Developmental Dynamics* 246(11): 779-801
- Polacik, M., Podrabsky, J.E. 2015. Temporary environments. In *Extremophile fishes* (pp. 217-245). Springer
- Prieur D. 2007. An extreme environment on earth: deep-sea hydrothermal vents lessons for exploration of Mars and Europa. In: *Grgaud M. et al (Eds), Lectures in Astrobiology, Advances in Astrobiology and Biogeophysics* 2: 319-345
- Prosser, J.L., Bohannon, B.J.M., Curtis, T.P., Ellis, R.J., Firestone, M.K., Freckleton, R.P., ..., Young, J.P.W. 2007. The role of ecological theory in microbial ecology. *Nature Reviews Microbiology* 5(5): 384-392
- Rampelotto, P.H. 2013. Extremophiles and extreme environments. *Life* 3(2013): 482-485
- Riesch, R., Tobler, M., Lerp, H., Jourdan, J., Doumas, T., Nosil, P., Langerhans, R.B., Plath, M. 2016. Extremophile Poeciliidae: multivariate insights into the complexity of speciation along replicated ecological gradients. *BMC Evolutionary Biology* 16(1): 1-15
- Riesch, R., Tobler, M., Plath, M. 2015. Extremophile fishes: ecology, evolution, and physiology of teleosts in extreme environments. Springer. New York
- Rosidah., Henny, C. 2012. Kajian logam Fe, Al, Cu dan Zn pada perairan kolong paska penambangan timah di Pulau Bangka. *Prosiding Seminar Nasional Limnologi VI*: 611-619
- Rothschild, L.J., Mancinelli, R.L. 2001. Life in extreme environments. *Nature* 409(6823): 1092-1101
- Ruttikay-Nedecky, B., Nejdil, L., Gumulec, J., Zitka, O., Masarik, M., Eckschlager, T., ..., Kizek, R. 2013. The role of metallothionein in oxidative stress. *International Journal of Molecular Sciences* 14(3): 6044-6066
- Sabolic, I., Breljak, D., Skarica, M., Herak-Kramberger, C.M. 2010. Role of metallothionein in cadmium traffic and toxicity in kidneys and other mammalian organs. *Biomaterials* 23(5): 897-926
- Sadeghi, S.H.R., Harchegani, M., Younesi, H.A. 2012. Suspended sediment concentration and particle size distribution, and their relationship with heavy metal content. *Journal of Earth System Science* 121(1): 63-71
- Sholihah, A., Delrieu-Trottin, E., Sukmono, T., Dahruddin, H., Risdawati, R., Elvyra, R., ..., Hubert, N. 2020. Disentangling the taxonomy of the subfamily Rasborinae (Cypriniformes, Danionidae) in Sundaland using DNA barcodes. *Scientific Reports* 10(1): 1-14
- Sinha, A., Sinha, R., Khare, S.K. 2014. Heavy metal bioremediation and nanoparticle synthesis by metallophilic. In *Geomicrobiology and Biogeochemistry* (pp. 101-118). Springer. Berlin
- Stamati, K., Mudera, V., Cheema, U. 2011. Evolution of oxygen utilization in multicellular organisms and implications for cell signalling in tissue engineering. *Journal of Tissue Engineering* 2(1): 1-12
- Strom, D., Simpson, S.L., Batley, G.E., Jolley, D.F. 2011. The influence of sediment particle size and organic carbon on toxicity of copper to benthic invertebrates in oxic/suboxic surface sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry* 30(7): 1599-1610
- Sudiyani, Y., Ardeniswan., Rahayuningwulan, D. 2011. Determinasi arsen (As) dan merkuri (Hg) dalam air dan sedimen di kolong bekas tambang timah (air kolong) di Propinsi Bangka Belitung, Indonesia. *Ecolab* 5(2): 55-66
- Sukarman., Gani, R.A. 2017. Lahan bekas tambang timah di Pulau Bangka dan Belitung, Indonesia dan kesesuaiannya untuk komoditas pertanian. *Jurnal Tanah dan Iklim* 41(2): 101-114
- Sukarman., Gani, R.A., Asmarhansyah. 2020. Tin mining process and its effects on soils in Bangka Belitung Islands Province, Indonesia. *Sains Tanah Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 17(2): 180-189
- Swathi, P., Sravanti, V. 2020. Extreme organisms: an astrobiological perspective, *Research Journal of Biotechnology* 15(10): 108-123
- Syarbaini., Warsona, A., Iskandar, D. 2014. Natural radioactivity in some food crops from Bangka-Belitung Islands, Indonesia. *Atom Indonesia* 40(1): 27-32
- Tan, G., Shu, W., Hallberg, K.B., Li, F., Lan, C., Huang, L. 2007. Cultivation-dependent and cultivation-independent characterization of the microbial community in acid mine drainage associated with acidic Pb/Zn mine tailings at Lechang, Guangdong, China. *FEMS Microbiology Ecology* 59(1): 118-126
- Thompson, A.W., Hayes, A., Podrabsky, J.E., Orti, G. 2017. Gene expression during delayed hatching in fish-out-of-water. *Ecological Genetics and Genomics* 3-5(2-17): 52-59
- Tobler, M., Riesch, R., Plath, M. 2015. Extremophile fishes: an integrative synthesis. *Extremophile Fishes* 279-296
- Toro, G., Pinto, M. 2015. Plant respiration under low oxygen. *Chilean Journal of Agricultural Research* 75(1): 57-70
- Turko, A.J., Wright, P.A. 2015. Evolution, ecology and physiology of amphibious killifishes (Cyprinodontiformes). *Journal of Fish Biology* 87(4): 815-835

- Ulukanli, Z., Digrak, M. 2002. Alkaliphilic micro-organisms and habitats. *Turkish Journal of Biology* 26(3): 181-191
- Wang, W.C., Mao, H., Ma, D.D., Yang, W.X. 2014. Characteristics, functions, and applications of metallothionein in aquatic vertebrates. *Frontiers in Marine Science* 1(34): 1-12
- Zhang, C., Yu, Z., Zeng, G., Jiang, M., Yang, Z., Cui, F., Zhu, M., Shen, L., Hu, L. 2014. Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. *Environment International* 73(2014): 270-281
- Zhao, H., Li, X., Wang, X., Tian, D. 2010. Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal pollution in urban runoff in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials* 183(1-3): 203-210