

ISOLASI DAN KARAKTERISASI BAKTERI ASAL SUMBER AIR PANAS NON-VULKANIK

Rahmad Lingga¹, Budi Afriyansyah², Reti Septiani³, Ina Miranti⁴
Universitas Bangka Belitung^{1,2,3,4}
linkarahmad@gmail.com¹

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengisolasi dan mengarakterisasi bakteri yang hidup di sumber air panas di Pulau Bangka. Metode penelitian yang digunakan meliputi isolasi bakteri; karakterisasi morfologi, determinasi kelompok Gram dan uji biokimia; identifikasi; dan uji ketahanan suhu bakteri termofilik. Sampel air panas diperoleh dari 2 lokasi yaitu Desa Pemali dan Desa Permis. Kisaran suhu air panas di kedua lokasi antara 38°C sampai 52°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat 22 isolat murni yang terdiri atas 9 isolat dari Desa Permis dan 13 isolat dari desa Pemali. Simpulan, hasil karakterisasi memperlihatkan seluruh isolat bakteri merupakan bakteri gram negatif dengan keragaman ciri biokimia berbeda.

Kata Kunci: Bakteri Termofilik, Non-Vulkanik, Pulau Bangka

ABSTRACT

This study aims to isolate and characterize bacteria that live in hot springs on Bangka Island. The research methods used include bacterial isolation; morphological characterization, Gram group determination and biochemical tests; identification; and thermophilic bacteria temperature resistance test. Hot water samples were obtained from 2 locations, namely Pemali Village and Permis Village. The hot water temperature range at both locations is between 38°C to 52°C. The results showed that 22 pure isolates were consisting of 9 isolates from Permis Village and 13 isolates from Pemali Village. In conclusion, the characterization results showed that all bacterial isolates were gram-negative bacteria with various biochemical characteristics.

Keywords: *Thermophilic Bacteria, Non-Volcanic, Bangka Island*

PENDAHULUAN

Pulau Bangka merupakan sebuah pulau yang masuk dataran Sunda dengan karakteristik yang unik. Pulau Bangka merupakan pulau yang memiliki deposit bahan mineral tambang yang sangat kaya, terutama timah. Di pulau Bangka juga ditemukan sumber air panas yang tersebar di beberapa daerah yaitu di Kabupaten Bangka Selatan, Bangka Tengah dan Bangka Barat. Karakteristik sumber air panas tersebut berbeda dengan sumber air panas lainnya di Indonesia, karena tidak berkaitan dengan aktivitas vulkanik atau gunung berapi (Widyaningrum & Kurniawan, 2019).

Sumber air panas merupakan habitat hidup bagi mikrob yang bersifat termofilik, seperti halnya bakteri termofilik terutama kelompok Actinobacteria, Proteobacteria dan Acidobacteria (Ovando-Chacon et al., 2020). Bakteri

termofilik dapat hidup dan berkembangbiak pada kondisi suhu yang ekstrim, berkisar antara 45°C-122°C. Selain bakteri, mikroba lain yang termasuk ke dalam organisme termofilik adalah kelompok Archaea yang umumnya dapat ditemukan pada sumber air panas di darat maupun laut dalam (El-Gayar et al., 2017).

Karakteristik hidup mikroba pada lingkungan ekstrim seperti sumber air panas berkaitan dengan enzim yang beradaptasi karena memiliki komponen unik yang mampu mempertahankan stabilitas dan konformasi yang fleksibel, sehingga dapat berfungsi secara optimal pada kondisi tersebut (Sang et al., 2020). Hasil penelitian menunjukkan stabilitas tersebut berkaitan dengan keberadaan interaksi elektrostatis yang dipengaruhi oleh keberadaan jembatan garam pada struktur protein termofilik (Xia et al., 2018).

Kajian tentang mikroba termofilik mendapat perhatian karena potensinya sebagai sumber material tahan panas seperti enzim termofilik. Kelompok enzim termofilik yang banyak dikenal antara lain Amilase, Selulase, Xylanase, Chitinase, Protease dan Lipase (Alrumman et al., 2018; Ardhi et al., 2020). Di Indonesia, penelitian mengenai bakteri termofilik telah banyak dilakukan, baik dalam aspek keragaman maupun potensi aplikasinya bagi industri (Ardhi et al., 2020; Irdawati et al., 2018; Lischer et al., 2020). Akan tetapi, informasi mengenai bakteri termofilik asal sumber air panas non-vulkanik masih sangat minim. Oleh karena itu, penelitian ini dilaksanakan untuk mengisolasi dan mengarakterisasi bakteri asal sumber air panas non-vulkanik di Pulau Bangka.

METODE PENELITIAN

Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel air panas dilakukan pada dua sumber air panas non-vulkanik yaitu di Desa Pemali dan Desa Permis. Sampel air yang telah diperoleh dipindahkan ke dalam botol steril untuk kemudian dibawa ke laboratorium dalam wadah khusus untuk langsung dilakukan isolasi bakteri pada media.

Isolasi Bakteri Termofilik

Sampel air panas terlebih dahulu dilakukan pengenceran serial sampai 10^{-6} . Masing-masing pengenceran kemudian disebar ke media Nutrient Agar (NA) dengan tiga ulangan. Cawan kemudian diinkubasi dan dilakukan pengamatan jumlah dan ciri koloni setelah 24 jam. Koloni yang terbentuk kemudian dimurnikan untuk dilakukan karakterisasi lanjutan.

Pewarnaan Gram dan Uji Biokimia

Pewarnaan gram dilakukan untuk mengetahui sifat gram serta bentuk sel isolat bakteri. Isolat bakteri (usia 24 jam) diambil secara aseptik dan diletakkan pada gelas objek yang steril. Selanjutnya objek lalu diratakan dan difiksasi kembali di atas lampu spiritus, kemudian ditetaskan kristal violet 2-3 tetes selama 1 menit setelah dingin, kemudian dicuci dengan air mengalir dan dikeringkan di udara. Isolat bakteri ditetesi dengan Iodium selama 1 menit, dicuci dengan air mengalir, dikeringkan di udara dan ditetesi dengan Alkohol 96 % selama 30 detik, lalu dicuci dengan air mengalir dan dikeringkan di udara, selanjutnya ditetesi dengan Safranin selama 45 detik. Langkah selanjutnya adalah gelas objek dicuci dengan air mengalir, kemudian diamati menggunakan mikroskop cahaya.

Selanjutnya dilakukan uji biokimia yang meliputi Uji Indol, Uji Voges-Proskauer, uji motilitas, uji TSIA, uji sitrat dan uji metil merah.

Uji Ketahanan Suhu

Untuk mengkonfirmasi karakteristik termofilik isolat bakteri, dilakukan uji ketahanan terhadap perlakuan suhu mulai dari 40°C sampai 100°C (interval 10°C). Sebanyak 100 µl kultur cair 10⁶ CFU/ml ditambahkan ke dalam 900 µl NaCl dan diperlakukan dengan variasi suhu tertentu dan dipertahankan selama 30 menit. Selanjutnya, cairan berisi kultur bakteri tersebut disimpan dalam kotak pendingin dan disebar pada media NA untuk dihitung jumlah koloni yang tumbuh.

HASIL PENELITIAN

Karakteristik Sumber Air Panas

Pengambilan sampel air panas dilakukan di dua lokasi berbeda, yaitu Permis dan Pemali. Sumber air panas Permis berlokasi di Kecamatan Simpang Rimba, Kabupaten Bangka Selatan, sedangkan sumber air panas Pemali berlokasi di Kecamatan Sungailiat, Kabupaten Bangka. Secara umum, sumber air panas pada kedua lokasi berupa sumur atau kolam kecil pada permukaan tanah (Gambar 1). Air panas yang berasal dari kolam tersebut kemudian dialirkan ke kolam yang lebih besar untuk keperluan pemandian umum. Berikut ini ditampilkan karakteristik mikroklimat lokasi pengambilan kedua sampel tersebut:



Gambar 1. Sumber Air Panas Non-Vulkanik: (a) Kolam sumber air panas Desa Permis; (b) Air panas yang dialirkan ke kolam pemandian di Desa Pemali

Tabel 1. Hasil Pengukuran Mikroklimat Titik Pengambilan Sampel di Desa Permis dan Desa Pemali

Stasiun/Kolam	Suhu(°C)	pH	DO (mg/L)
Desa Permis			
1	47	6,75	3,57
	48	6,76	3,56
	44	6,83	2,59
2	51	6,90	4,49
	52	6,92	3,54
	50	7,16	4,82

Desa Pemali			
1	40	7.21	3,01
	40	7.20	3,06
	40	7.19	3,19
2	39	7.33	3,69
	38	7.25	3,04
	39	7.30	3,92

Berdasarkan hasil pengamatan yang dilakukan terhadap parameter fisika menunjukkan bahwa suhu sumber air panas di Permis (47-52°C) lebih tinggi dibandingkan dengan sumber air panas di Pemali (38-40°C). Sementara itu, dalam hal nilai pH lokasi Permis (kisaran 6,75-7,16) bersifat lebih asam dibandingkan dengan lokasi Pemali (kisaran 7,19-7,33).

Isolat Bakteri dari Sumber Air Panas

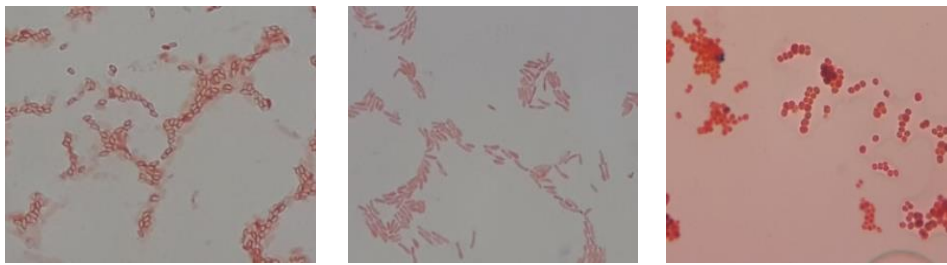
Berdasarkan hasil pemurnian atas koloni bakteri yang berhasil diisolasi, diperoleh sebanyak 22 isolat murni. Dari sumber air panas Desa Pemali diperoleh sebanyak 13 isolat dan 9 isolat lainnya dari Desa Permis. Keseluruhan isolat tersebut memiliki variasi dalam karakteristik morfologi koloni meliputi warna, elevasi, tepi dan bentuk koloni.

Tabel 2. Karakteristik Koloni Isolat Bakteri dari Sumber Air Panas Desa Pemali dan Desa Permis

No.	Kode Isolat	Warna	Elevasi	Margin	Bentuk
Desa Pemali					
1	PL1	Putih	<i>Flat</i>	<i>Lobate</i>	<i>Rhizoid</i>
2	PL2	Putih	<i>Umbonate</i>	<i>Filiform</i>	<i>Circular</i>
3	PL3	Putih	<i>Flat</i>	<i>Entire</i>	<i>Circular</i>
4	PL4	Putih	<i>Flat</i>	<i>Entire</i>	<i>Circular</i>
5	PL5	Putih	<i>Flat</i>	<i>Entire</i>	<i>Circular</i>
6	PL6	Peach	<i>Convex</i>	<i>Entire</i>	<i>Circular</i>
7	PL7	Putih	<i>Flat</i>	<i>Filiform</i>	<i>Circular</i>
8	PL8	Oranye	<i>Flat</i>	<i>Entire</i>	<i>Circular</i>
9	PL9	Oranye	<i>Flat</i>	<i>Entire</i>	<i>Circular</i>
10	PL10	Oranye tua	<i>Low convex</i>	<i>Entire</i>	<i>Circular</i>
11	PL11	Kuning	<i>Flat</i>	<i>Entire</i>	<i>Circular</i>
12	PL12	Kuning	<i>Flat</i>	<i>Filiform</i>	<i>Rhizoid</i>
13	PL13	Kuning, gelap ditengah	<i>Umbonate</i>	<i>Entire</i>	<i>Circular</i>
Desa Permis					
1	PR1	Kuning Kuningit	<i>Convex</i>	<i>Smooth</i>	Bulat
2	PR2	Putih bening	<i>Raised</i>	<i>Smooth</i>	Bulat
3	PR3	Kuning keruh	<i>Flat</i>	<i>Irregular</i>	<i>Irregular</i>
4	PR5	Putih susu	<i>Raised</i>	<i>Smooth</i>	Bulat
5	PR6	Coklat muda	<i>Raised</i>	<i>Smooth</i>	Bulat
6	PR7	Putih	<i>Raised</i>	<i>Smooth</i>	Bulat
7	PR9	Kuning	<i>Convex</i>	<i>Smooth</i>	Bulat
8	PR10	Oranye	<i>Raised</i>	<i>Smooth</i>	Bulat
9	PR11	Krim	<i>Raised</i>	<i>Smooth</i>	Bulat

Karakteristik Isolat Bakteri dari Sumber Air Panas

Karakteristik sel dan pewarnaan Gram merupakan karakteristik penting yang diperlukan untuk identifikasi bakteri. Pewarnaan gram didasarkan pada perbedaan struktur dinding sel bakteri, sehingga menyebabkan perbedaan reaksi dalam permeabilitas zat warna dan penambahan larutan pencuci. Pada Tabel 3 ditampilkan karakteristik sel dan pewarnaan isolat bakteri yang diperoleh. Keseluruhan isolat yang diperoleh termasuk ke dalam kelompok bakteri Gram negatif dengan ciri warna sel pada akhir tahapan pewarnaan adalah merah (Gambar 2). Secara umum bentuk dan penataan sel adalah bentuk batang dan kokus dengan penataan tunggal.



Gambar 2. Bentuk dan Penataan Sel serta Karakteristik Gram Isolat Bakteri dari Sumber Air Panas

Semua isolat memperlihatkan warna merah setelah seluruh tahapan pewarnaan dilakukan. Warna merah ini mengindikasikan bahwa isolat bakteri termasuk kelompok bakteri gram negatif. Selain itu isolat bakteri juga berbentuk bulat (*Coccus*), batang, batang pendek dan *sarcina*. Sarcina atau tetrad adalah bakteri yang berbentuk bulat dengan susunannya seperti kubus. Secara umum, sel memiliki ciri negatif untuk uji *methyl red*, VP, sitrat dan indol. Isolat bakteri hanya memperlihatkan ciri positif untuk uji motilitas. Pengecualian ada pada isolat PL2 (positif uji sitrat) dan isolat PL3 (positif uji *methyl red*).

Tabel 3. Karakteristik Biokimia Isolat Bakteri Asal Air Panas

No	Kode isolat	Gram	Bentuk/Penataan Sel	MR	V P	M ot	Si t	In dol	TSI A	Identitas
Permis										
1	PR1	Negatif	Kokus/tunggal	-	-	+	-	-	K/K	<i>Alcaligenes</i>
2	PR2	Negatif	Batang	-	-	+	+	-	M/K	<i>Alcaligenes</i>
3	PR3	Negatif	Batang/tunggal	+	-	+	-	-	K/K	<i>Alcaligenes</i>
4	PR5	Negatif	Batang/tunggal	-	-	+	-	-	K/K	<i>Alcaligenes</i>
5	PR6	Negatif	Batang/tunggal	-	-	+	-	-	K/K	<i>Alcaligenes</i>
6	PR7	Negatif	Batang/tunggal	-	-	+	-	-	K/K	<i>Alcaligenes</i>
7	PR9	Negatif	Kokus/diplo	-	-	+	-	-	K/K	<i>Alcaligenes</i>
8	PR10	Negatif	Batang pendek	-	-	+	-	-	K/K	<i>Erythrobacter</i>
9	PR11	Negatif	Batang	-	-	+	-	-	M/K	<i>Alcaligenes</i>
Pemali										
1	PL1	Negatif	Kokus	-	-	+	-	-	K/K	<i>Neisseria</i>
2	PL2	Negatif	Kokus	-	-	+	-	-	K/K	<i>Nitrosococcus</i>
3	PL3	Negatif	Kokus	-	-	+	-	-	K/K	<i>Alcaligenes</i>
4	PL4	Negatif	Kokus	-	-	+	-	-	K/K	<i>Alcaligenes</i>

5	PL5	Negatif	Kokus	-	-	+	-	-	K/K	<i>Neisseria</i>
6	PL6	Negatif	Kokus	-	-	+	-	-	K/K	<i>Neisseria</i>
7	PL7	Negatif	Kokus	-	-	+	-	-	K/K	<i>Neisseria</i>
8	PL8	Negatif	Kokus	-	-	+	-	-	K/K	<i>Roseobacter</i>
9	PL9	Negatif	Kokus	-	-	+	-	-	K/K	<i>Roseobacter</i>
10	PL10	Negatif	Kokus	-	-	+	-	-	K/K	<i>Roseobacter</i>
11	PL11	Negatif	Kokus	-	-	+	-	-	K/K	<i>Alcaligenes</i>
12	PL12	Negatif	Kokus	-	-	+	-	-	K/K	<i>Nitrococcus</i>
13	PL13	Negatif	<i>Sarcina</i>	-	-	+	-	-	K/K	<i>Alcaligenes</i>

(Keterangan: + = Positif, - = Negatif, K = Kuning, M = Merah)

Ketahanan terhadap Perlakuan Suhu

Untuk mengkonfirmasi bahwa semua isolat bakteri yang diperoleh memiliki ciri bakteri termofilik, semua isolat diperlakukan dengan suhu 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C, 100°C. Pada Tabel 4 berikut ditampilkan ketahanan isolat bakteri pada perlakuan suhu berbeda. Secara umum, seluruh isolat tidak mampu tumbuh setelah diperlakukan dengan suhu 90°C dan 100°C. Dari kedua lokasi pengambilan sampel, diperoleh 5 isolat yang tahan terhadap perlakuan suhu 80°C yaitu isolat PR1, PR5 dan PR11 (Permis) dan isolat PL1 dan PL2 (Pemali). Sebagian besar isolat dapat hidup pada perlakuan suhu 40°C kecuali isolat PR2, PR3, PR7 (Permis), PL4, PL10 (Pemali).

Tabel 4. Ketahanan Isolat Bakteri Termofilik terhadap Perlakuan Suhu

No	Kode Isolat	Perlakuan suhu						
		40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C
Permis								
1	PR1	+	+	+	+	+	-	-
2	PR2	-	-	-	-	-	-	-
3	PR3	-	-	-	-	-	-	-
4	PR5	+	+	+	+	+	-	-
5	PR6	+	+	+	+	-	-	-
6	PR7	-	-	-	-	-	-	-
7	PR9	+	+	+	+	-	-	-
8	PR10	+	+	+	+	-	-	-
9	PR11	+	+	+	+	+	-	-
Pemali								
1	PL1	+	+	+	+	+	-	-
2	PL2	+	+	+	+	+	-	-
3	PL3	+	+	+	-	-	-	-
4	PL4	+	-	-	-	-	-	-
5	PL5	+	+	+	+	-	-	-
6	PL6	+	+	-	-	-	-	-
7	PL7	+	+	-	-	-	-	-
8	PL8	+	+	+	-	-	-	-
9	PL9	+	+	+	-	-	-	-
10	PL10	+	-	-	-	-	-	-
11	PL11	+	+	-	-	-	-	-
12	PL12	+	+	+	-	-	-	-
13	PL13	+	+	+	-	-	-	-

(Keterangan: + = Positif, - = Negatif)

PEMBAHASAN

Karakteristik dari sumber air panas pada penelitian ini adalah kandungan oksigen terlarut (DO) yang terbilang rendah. Hal ini dapat dimaklumi sehubungan dengan karakteristik air panas tersebut yang memiliki suhu di atas suhu optimal untuk organisme lain yang berperan dalam menghasilkan oksigen seperti tumbuhan air maupun organisme prokariot fotosintetik. Hal ini juga berkaitan dengan keberadaan suhu air yang merupakan faktor penentu kadar oksigen terlarut dalam perairan karena dapat mempengaruhi kelarutan oksigen dan karbondioksida (Febiyanto, 2020). Keberadaan oksigen terlarut dalam suatu perairan memainkan peranan penting bagi kehidupan organisme di dalamnya. Hal tersebut dikarenakan peranan oksigen yang sangat penting dalam proses pembentukan energi dalam metabolisme seluler (Hamuna et al., 2018).

Tiap kolam didapatkan isolat dengan jumlah yang berbeda-beda. Adanya perbedaan jumlah isolat yang didapatkan pada masing-masing kolam dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang mendukung kehidupan bakteri. Faktor biotik yang terdapat pada lokasi pengambilan sampel di antaranya jumlah kunjungan manusia yang berendam air panas menjadi sumber keanekaragaman bagi mikroorganisme. Sebagaimana diketahui bahwa beberapa faktor yang berpengaruh dalam keanekaragaman genetik dan metabolisme setiap mikroorganisme yang hidup di suatu habitat antara lain derajat keasaman (pH), komposisi gas dan mineral, reaksi oksidasi/reduksi serta nutrisi yang bervariasi (Oberbeckmann et al., 2018; Wu et al., 2018).

Hasil identifikasi memperlihatkan bahwa semua isolat yang diperoleh merupakan kelompok bakteri Gram negatif. Bakteri Gram negatif memang dikenal sebagai kelompok bakteri yang memerlukan nutrisi yang relatif lebih sederhana dibandingkan dengan bakteri Gram positif. Hal ini berarti kemampuan kelompok bakteri ini untuk tumbuh pada suatu lingkungan lebih besar dibandingkan bakteri gram positif. Secara biokimia, bakteri yang diperoleh memiliki ciri yang hampir seragam. Hanya saja ada beberapa isolat yang memperlihatkan kemampuan untuk memanfaatkan sumber karbon dengan mekanisme berbeda. Ciri biokimia yang berbeda menjadi indikasi perbedaan cara hidup bakteri tersebut, seperti kemampuan dalam memanfaatkan sumber karbon yang tersedia. Hal ini sejalan dengan keberadaan bakteri yang dikenal memiliki peranan penting dalam siklus biogeokimia di lingkungan perairan (Arora-Williams et al., 2018; York, 2018)

Berdasarkan hasil uji ketahanan suhu, terlihat bahwa semakin tinggi perlakuan suhu, maka jumlah isolat bakteri yang mampu hidup semakin sedikit. Namun secara keseluruhan, rata-rata bakteri tersebut mampu hidup di suhu yang tinggi atau dapat dikatakan termasuk ke dalam golongan bakteri termofil. Bakteri termofil merupakan bakteri yang mampu tumbuh pada suhu 45-80°C, bahkan ada yang mampu tumbuh hingga 100°C (Rantuboi et al., 2018). Kelompok bakteri seperti ini memiliki kemampuan untuk toleran terhadap suhu lingkungan yang ekstrim serta mampu untuk bertahan hidup dan berkembangbiak pada kondisi tersebut (Ovando-Chacon et al., 2020).

Isolat bakteri termofilik tersebut mampu tumbuh pada suhu tinggi karena memiliki enzim termostabil. Selain itu, protein yang terdapat pada sel bakteri tersebut memiliki ikatan hidrofobik dan ikatan ionik yang sangat kuat. Komposisi membran sel bakteri termofilik tersusun oleh asam lemak jenuh yang

menyebabkan struktur membran tersebut stabil pada kondisi suhu tinggi (Villanueva et al., 2021). Selain itu, kelompok bakteri termofilik dapat mensintesis protein yang bersifat tahan panas dan tahan denaturasi sehingga mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungan bersuhu ekstrim (Attri et al., 2018).

Bakteri termofilik merupakan sumber potensial berbagai enzim yang penting untuk industri diantaranya enzim protease, amilase, xylanase termofilik, dll. Banyak kajian yang telah melaporkan potensi enzim termofilik dari berbagai daerah di Indonesia (Arzita et al., 2017; Irdawati et al., 2018). Sementara itu, laporan mengenai bakteri termofilik non-vulkanik di Bangka Belitung masih sangat sedikit. Penelitian sejenis sangat dibutuhkan untuk menggali lebih dalam lagi potensi bakteri termofilik asal sumber air panas non-vulkanik. Hal ini dikarenakan bakteri termofilik merupakan sumber daya alami potensial yang dapat digali potensi dan kemanfaatannya untuk berbagai keperluan terutama dalam produksi enzim dan senyawa lainnya yang memiliki karakteristik tahan terhadap panas atau suhu tinggi, sehingga sesuai untuk keperluan industri.

SIMPULAN

Isolat bakteri termofilik yang diperoleh pada penelitian ini merupakan bakteri Gram negatif yang memiliki karakteristik tahan terhadap perlakuan suhu tinggi. Isolat bakteri termofilik merupakan sumber daya hayati potensial yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan misalnya untuk keperluan enzim tahan panas bagi keperluan industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Alrumman, S., Mostafa, Y. S. M., Al-Qahtani, S., & Taha, T. H. T. (2018). Hydrolytic Enzyme Production by Thermophilic Bacteria Isolated from Saudi Hot Springs. *Open Life Sciences*, 13(1), 470–480. <https://doi.org/10.1515/biol-2018-0056>
- Ardhi, A., Sidauruk, A. N., Suraya, N., Pratiwi, N. W., Pato, U., & Saryono. (2020). Molecular Identification of Amylase-Producing Thermophilic Bacteria Isolated from Bukit Gadang Hot Spring, West Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas*, 21(3), 994–1000. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210319>
- Arora-Williams, K., Olesen, S. W., Scandella, B. P., Delwiche, K., Spencer, S. J., Myers, E. M., Abraham, S., Sooklal, A., & Preheim, S. P. (2018). Dynamics of Microbial Populations Mediating Biogeochemical Cycling in a Freshwater Lake. *Microbiome*, 6(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s40168-018-0556-7>
- Arzita, A., Syamsuardi, S., Agustien, A., & Rilda, Y. (2017). The Diversity of the Alkaline Protease Producers, Thermophilic Obligate *Bacillus* spp., from Sungai Tutung Hot Spring, Kerinci, Jambi, Indonesia. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 11(4), 1789–1797. <https://doi.org/10.22207/JPAM.11.4.18>
- Attri, P., Han, J., Choi, S., Choi, E. H., Bogaerts, A., & Lee, W. (2018). CAP Modifies the Structure of a Model Protein from Thermophilic Bacteria: Mechanisms of Cap-Mediated Inactivation. *Scientific Reports*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28600-w>
- El-Gayar, K. E., Al Abboud, M. A., & Essa, A. M. M. (2017). Characterization of

- Thermophilic Bacteria Isolated From Two Hot Springs in Jazan, Saudi Arabia. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 11(2), 743–752. <https://doi.org/10.22207/JPAM.11.2.13>
- Febiyanto, F. (2020). Effects of Temperature and Aeration on the Dissolved Oxygen (DO) Values in Freshwater Using Simple Water Bath Reactor: A Brief Report. *Walisongo Journal of Chemistry*, 3(1), 25-30. <https://doi.org/10.21580/wjc.v3i1.6108>
- Hamuna, B., Tanjung, R. H. R., Suwito, S., Maury, H. K., & Alianto, A. (2018). Kajian Kualitas Air Laut dan Indeks Pencemaran Berdasarkan Parameter Fisika-Kimia di Perairan Distrik Depapre, Jayapura. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 16(1), 35-43. <https://doi.org/10.14710/jil.16.1.35-43>
- Irdawati, I., Syamsuardi, S., Agustien, A., & Rilda, Y. (2018). Screening of Thermophilic Bacteria Produce Xylanase from Sapan Sungai Aro Hot Spring South Solok. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 335(1), 1-12. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/335/1/012021>
- Lischer, K., Putra, A. B. R. D., Guslianto, B. W., Avilla, F., Sitorus, S. G., Nugraha, Y., & Sarmoko. (2020). Short Communication: The Emergence and Rise of Indigenous Thermophilic Bacteria Exploration from Hot Springs in Indonesia. *Biodiversitas*, 21(11), 5474–5481. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d211156>
- Oberbeckmann, S., Kreikemeyer, B., & Labrenz, M. (2018). Environmental Factors Support The Formation of Specific Bacterial Assemblages on Microplastics. *Frontiers in microbiology*, 8, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02709>
- Ovando-Chacon, S. L., Tacias-Pascacio, V. G., Ovando-Chacon, G. E., Rosales-Quintero, A., Rodriguez-Leon, A., Ruiz-Valdiviezo, V. M., & Servin-Martinez, A. (2020). Characterization of Thermophilic Microorganisms in The Geothermal Water Flow of El Chichón Volcano Crater Lake. *Water (Switzerland)*, 12(8), 1-16. <https://doi.org/10.3390/W12082172>
- Rantuboi, D. Y. P., Gunaedi, T., Simonapendi, M., & Pakpahan, N. (2018). Isolasi dan Identifikasi Bakteri Termofilik dari Sumber Air Panas di Moso Distrik Muara Tami Kota Jayapura Provinsi Papua. *J Biol Papua*, 10(2), 68–73. <https://ejournal.uncen.ac.id/index.php/JBP/index>
- Sang, P., Liu, S. Q., & Yang, L. Q. (2020). New Insight into Mechanisms of Protein Adaptation to High Temperatures: A Comparative Molecular Dynamics Simulation Study of Thermophilic and Mesophilic Subtilisin-Like Serine Proteases. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(9), 1-12. <https://doi.org/10.3390/ijms21093128>
- Villanueva, L., von Meijenfeldt, F. A. B., Westbye, A. B., Yadav, S., Hopmans, E. C., Dutilh, B. E., & Damsté, J. S. S. (2021). Bridging the Membrane Lipid Divide: Bacteria of the FCB Group Superphylum Have the Potential to Synthesize Archaeal Ether Lipids. *ISME Journal*, 15(1), 168–182. <https://doi.org/10.1038/s41396-020-00772-2>
- Widyaningrum, Y., & Kurniawan, W. B. (2019). Karakteristik Batuan Penyusun Sumber Mata Air Panas Desa Nyelanding Kecamatan Air Gegas Kabupaten Bangka Selatan (Sebuah Rangkuman). *Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat*, 2–5.

<https://journal.ubb.ac.id/index.php/snppm/article/view/1362>

- Wu, Z., Liu, Q., Li, Z., Cheng, W., Sun, J., Guo, Z., Li, Y., Zhou, J., Meng, D., Li, H., Lei, P., & Yin, H. (2018). Environmental Factors Shaping the Diversity of Bacterial Communities that Promote Rice Production. *BMC Microbiology*, *18*(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12866-018-1174-z>
- Xia, Y. L., Sun, J. H., Ai, S. M., Li, Y., Du, X., Sang, P., Yang, L. Q., Fu, Y. X., & Liu, S. Q. (2018). Insights into the Role of Electrostatics in Temperature Adaptation: A Comparative Study of Psychrophilic, Mesophilic, and Thermophilic Subtilisin-Like Serine Proteases. *RSC Advances*, *8*(52), 29698–29713. <https://doi.org/10.1039/c8ra05845h>
- York, A. (2018). Environmental Microbiology: Marine Biogeochemical Cycles in a Changing World. *Nature Reviews Microbiology*, *16*(5), 259. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.40>