

***Thermus aquaticus*: Keunikan Genetik dan Perannya dalam Revolusi PCR melalui Taq Polymerase**

Thermus aquaticus: Genetic Uniqueness and Its Role in PCR Revolution via Taq Polymerase

Andi Tenri Ampa Nurfitri Papada¹, Dewi Astuti S², Yusminah Hala³

^{1,2,3}Program Pasca Sarjana, Universitas Negeri Makassar, Indonesia

Email: ¹tenria011@gmail.com, ²dewiastutisym3006@gmail.com

³yushala@unm.ac.id

Abstrak

Thermus aquaticus merupakan bakteri termofilik yang dikenal karena kemampuannya menghasilkan enzim termostabil, seperti Taq polymerase, yang berperan penting dalam teknik Polymerase Chain Reaction (PCR). Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik, ekologi, serta potensi aplikasi enzim termostabil yang dihasilkan oleh bakteri ini dalam berbagai bidang industri dan bioteknologi. Kajian dilakukan melalui tinjauan literatur dengan metode pencarian pada basis data ilmiah seperti PubMed, Scopus, dan Google Scholar. Hasil kajian menunjukkan bahwa *T. aquaticus* memiliki suhu pertumbuhan optimal antara 70-75°C dan ditemukan di lingkungan ekstrem seperti mata air panas dan sistem hidrotermal. Karakteristiknya yang mencakup dinding sel yang kuat, kandungan lipid membran yang unik, serta enzim termostabil memungkinkan bakteri ini bertahan dalam kondisi suhu tinggi. Enzim Taq polymerase yang diisolasi dari bakteri ini telah merevolusi bidang bioteknologi, terutama dalam PCR yang digunakan untuk amplifikasi DNA dalam penelitian genetika, kedokteran, dan forensik. Selain dalam PCR, enzim termostabil dari *T. aquaticus* memiliki aplikasi luas dalam industri makanan, farmasi, serta bioremediasi. Keberadaannya dalam ekosistem menunjukkan peran penting dalam siklus biogeokimia dan interaksinya dengan mikroorganisme lain dalam lingkungan ekstrem. Temuan ini menegaskan bahwa eksplorasi mikroorganisme ekstremofil, termasuk *T. aquaticus*, masih memiliki potensi besar dalam inovasi teknologi dan pengembangan industri berbasis bioteknologi.

Kata Kunci: Enzim; *Thermus aquaticus*; Termofilik; *Polymerase*; PCR

Abstract

Thermus aquaticus is a thermophilic bacterium known for its ability to produce thermostable enzymes, such as Taq polymerase, which plays an important role in the Polymerase Chain Reaction (PCR) technique. This study aims to examine the characteristics, ecology, and potential applications of thermostable enzymes produced by this bacterium in various industrial and biotechnological fields. The study was conducted through a literature review using a search method in scientific databases such as PubMed, Scopus, and Google Scholar. The results of the study showed that *T. aquaticus* has an optimal growth temperature between 70-75°C and is found in extreme environments such as hot springs and hydrothermal systems. Its characteristics, which include strong cell walls, unique membrane lipid content, and thermostable enzymes, allow this bacterium to survive in high temperature conditions. The Taq polymerase enzyme isolated from this bacterium has revolutionized the field of biotechnology, especially in PCR which is used for DNA amplification in genetics, medicine, and forensics research. In addition to PCR, thermostable enzymes from *T. aquaticus* have wide applications in the food, pharmaceutical, and bioremediation industries. Its existence in the ecosystem shows an important role in the biogeochemical cycle and its interaction with other microorganisms in extreme environments. This finding confirms that the exploration of extremophile microorganisms, including *T. aquaticus*, still has great potential in technological innovation and the development of biotechnology-based industries.

Keywords: Enzyme; *Thermus aquaticus*; Thermophilic; *Polymerase*; PCR

PENDAHULUAN

Thermus aquaticus merupakan salah satu mikroorganisme yang dikenal karena kemampuannya menghasilkan enzim termostabil yang memiliki banyak manfaat dalam bioteknologi dan industri. Enzim

termostabil yang dihasilkan oleh bakteri ini mampu mempertahankan aktivitasnya dalam kondisi suhu tinggi, sehingga sering digunakan dalam berbagai proses yang membutuhkan ketahanan terhadap panas (Brock, 1978).

Salah satu enzim paling dikenal dari *Thermus aquaticus* adalah Taq polymerase, yang berperan penting dalam teknik Polymerase Chain Reaction (PCR). Teknik ini memungkinkan replikasi DNA dalam jumlah besar dan telah digunakan secara luas dalam berbagai bidang, termasuk kedokteran, diagnostik penyakit, dan forensic (Mangrola, 2021).

Selain dalam PCR, enzim termostabil juga memiliki aplikasi luas dalam industri lainnya, seperti pengolahan makanan, farmasi, dan rekayasa protein. Keunggulan enzim ini meliputi kestabilan struktural, peningkatan efisiensi reaksi, serta ketahanan terhadap denaturasi akibat suhu tinggi atau kondisi lingkungan ekstrem (Dustin, 2005)

Penelitian terhadap enzim termostabil terus berkembang, dengan fokus pada pengembangan enzim baru yang memiliki efisiensi lebih tinggi dan dapat diterapkan dalam berbagai industri. Potensi enzim ini dalam inovasi teknologi menjadikannya salah satu topik penting dalam bioteknologi modern (Brock, 1978)

METODOLOGI

Tinjauan literatur dilakukan dengan menggunakan kombinasi kata kunci dari Medical Subject Headings (MeSH), yaitu "*Thermus aquaticus*", "*Hot Springs*", "*Bacterial Isolation*", "*Genome Sequencing*", "*Plasmid Analysis*", dan "*Taxonomy*". Pencarian dilakukan pada basis data PubMed (NIH), Scopus, EMBASE, dan Google Scholar. Selain itu, daftar referensi dari publikasi yang relevan juga diperiksa secara manual. Kriteria inklusi mencakup artikel yang berfokus pada isolasi, karakterisasi, dan analisis genom *Thermus aquaticus*, serta penelitian yang menggunakan metode eksperimental yang jelas dan replikasi hasil yang valid. Artikel yang tidak memiliki data eksperimen yang cukup atau hanya berupa opini ditinjau secara kritis namun tidak dimasukkan dalam analisis utama. Setelah artikel diperoleh, data yang relevan dikategorikan berdasarkan metode isolasi, karakterisasi morfologi dan fisiologi, serta analisis genom dan plasmid.

Studi dibandingkan berdasarkan teknik yang digunakan, kondisi lingkungan tempat isolasi, serta signifikansi hasil dalam konteks penelitian mikrobiologi dan bioteknologi

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Sejarah Penemuan *Thermus aquaticus*

Penelitian mengenai bakteri termofilik mengalami perkembangan pesat sejak ditemukannya *Thermus aquaticus* pada tahun 1966 oleh Dr. Thomas Brock di sumber air panas Taman Nasional Yellowstone, Amerika Serikat¹. Penemuan ini menjadi tonggak penting dalam mikrobiologi karena menantang anggapan sebelumnya bahwa kehidupan tidak dapat bertahan di lingkungan dengan suhu ekstrem. *Thermus aquaticus* diketahui mampu hidup pada suhu lebih dari 55°C, bahkan optimal pada suhu sekitar 70°C. Kemampuannya bertahan dalam kondisi ekstrem menarik perhatian banyak ilmuwan, terutama dalam pencarian enzim yang dapat bekerja pada suhu tinggi (Maangrola, 2021).

Pada tahun 1983, Dr. Kary Mullis menemukan bahwa enzim Taq polymerase, yang diisolasi dari *Thermus aquaticus*, memiliki kemampuan unik untuk mereplikasi DNA pada suhu tinggi tanpa mengalami denaturasi. Enzim ini kemudian menjadi elemen kunci dalam pengembangan Polymerase Chain Reaction (PCR), teknik yang merevolusi bidang genetika, kedokteran, dan forensic (Dustin, 2005).

Penemuan ini membuktikan bahwa mikroorganisme yang hidup di lingkungan ekstrem memiliki potensi besar dalam berbagai aplikasi ilmiah dan industri. Selain itu, keberadaan *Thermus aquaticus* mendorong eksplorasi lebih lanjut terhadap mikroba ekstremofil lain yang mungkin memiliki manfaat serupa (Brock, 1978).

2. Ekologi *Thermus aquaticus*

Thermus aquaticus merupakan bakteri termofilik yang ditemukan di lingkungan dengan suhu tinggi, seperti mata air panas, sistem hidrotermal laut dalam, dan ekosistem geotermal lainnya¹. Habitat

alaminya memiliki suhu berkisar antara 50-80°C, dengan suhu optimal pertumbuhan sekitar 70-75°C². Kondisi lingkungan ini umumnya memiliki pH netral hingga sedikit basa (pH 6-8) serta kandungan mineral yang tinggi (Dustin, 2005).



Gambar 1. Ekosistem *Thermus aquaticus* di sumber air panas Yellowstone National Park.

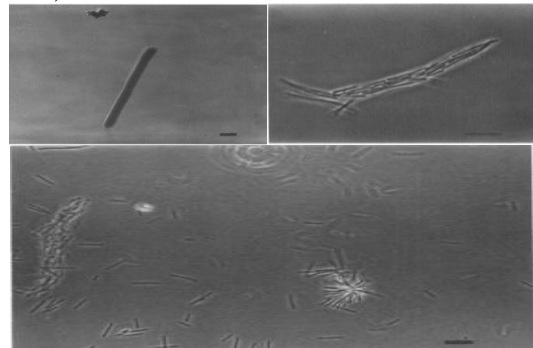
Keberadaan *T. aquaticus* dalam ekosistem ini menunjukkan bahwa mikroorganisme ekstremofil memiliki peran penting dalam siklus biogeokimia. Bakteri ini dapat memanfaatkan senyawa organik sederhana dan anorganik sebagai sumber energi, membantu dalam proses dekomposisi dan daur ulang nutrisi di lingkungan ekstrem (Mangrola, 2021).

Selain itu, *T. aquaticus* juga ditemukan dalam ekosistem buatan, seperti instalasi industri yang memanfaatkan air panas, serta dalam sistem geotermal yang digunakan untuk pembangkit listrik⁵. Studi lebih lanjut menunjukkan bahwa bakteri termofilik ini mampu bertahan di lingkungan dengan kadar logam berat yang lebih tinggi dibandingkan mikroorganisme lain, sehingga berpotensi digunakan dalam bioremediasi (Dustin, 2005).

3. Morfologi *Thermus aquaticus*

Thermus aquaticus adalah organisme berbentuk batang Gram-negatif yang tumbuh dengan baik antara suhu 50°C hingga 80°C dengan laju pertumbuhan maksimum pada suhu 65°C hingga 70°C (Brum et al., 2015). *T. aquaticus* tidak membentuk spora, dan tidak memiliki motilitas. Pada suhu di atas suhu optimal atau dalam fase stasioner, bakteri ini sering membentuk filamen panjang. Batang dan

filamen, berdiameter 0,5 hingga 0,8 um. Batang sepanjang 5 hingga 10 um, filamen dengan panjang bervariasi dari 20 hingga lebih dari 200 um. Batang dapat ditemukan secara tunggal atau dalam agregat, baik berdampingan maupun membentuk susunan ujung ke ujung seperti roset (Brock & Freese 1969).

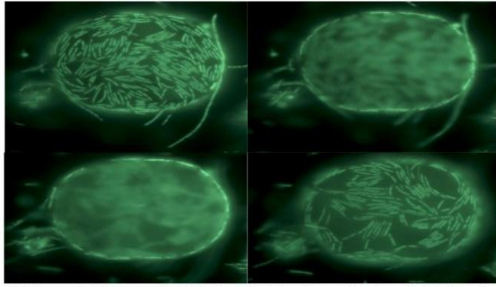


Gambar 2. Bentuk Tunggal, linear, dan roset

Sumber: (Brock & Freese 1969)

Batang *T. aquaticus* memiliki struktur dinding sel kompleks dengan, lapisan peptidoglikan, dan lapisan luar yang lebih jelas dibandingkan banyak bakteri gram-negatif lainnya. Membran plasma bakteri ini tampak menonjol, sementara materi nuklear dan ribosomnya mirip dengan bakteri lain, dengan ukuran ribosom sekitar 15 nm dan konstanta sedimentasi 70S (Zeikus et al., 1970). Selain itu, *T. aquaticus* dapat menghasilkan lendir dalam kondisi tertentu (Bayer, 1967).

Ciri unik *Thermus aquaticus* adalah morfologi selnya yang tidak biasa. Brock menggambarkan keberadaan "tubuh bulat" yang terbentuk dari asosiasi beberapa batang atau filamen *T. aquaticus* yang bergabung menjadi satu kesatuan. Struktur ini kemungkinan besar berfungsi sebagai mekanisme perlindungan dalam kondisi lingkungan ekstrem, di mana sel-sel *T. aquaticus* dapat saling berinteraksi untuk meningkatkan kelangsungan hidupnya termasuk penyimpanan makanan dan asam nukleat serta keterikatan dan organisasi koloni." (Brum et al., 2015).



Gambar 3. Tubuh Bulat pada *Thermus aquaticus*

Sumber : (Brum *et al.*,2015).

Thermus aquaticus membelah seperti *E. coli*, dengan melipat dinding dan membran sel hingga terbentuk dua sel baru. Membran plasmanya hampir tidak mengandung asam lemak tak jenuh, melainkan didominasi asam lemak bercabang yang menjaga fluiditas dan kestabilan pada suhu tinggi, karena asam lemak tak jenuh lebih rentan terhadap oksidasi dalam kondisi panas (Edward & Stevens, 1963).

4. Fisiologi *Thermus aquaticus*

Thermus aquaticus memiliki regulasi metabolisme yang kompleks untuk bertahan di lingkungan bersuhu tinggi. Metabolismenya dikendalikan oleh enzim dan gen secara ketat. Dalam siklus Krebs, siklus glioksilat dan fosfoenolpiruvat karboksilase berperan penting dalam pemanfaatan piruvat dan asetat. *T. aquaticus* juga memecah glukosa melalui jalur Embden-Meyerhof-Parnas dan dapat melakukan glukoneogenesis, menunjukkan fleksibilitas dalam penggunaan energi (Degryse & Glansdorff, 1981).

5. Genom *Thermus aquaticus*

Genom *Thermus aquaticus* khususnya pada strain Y51MC23 memiliki 68% GC dan terdiri dari satu kromosom utama (2,15 Mb) yang mencakup 2.309 gen pengkode protein, 50 gen tRNA, serta 2 gen untuk 5S, 16S, dan 23S rRNA. Bakteri ini juga memiliki megaplasmid dan empat plasmid berukuran 14 kb, 16 kb, 70 kb, dan 79 kb. Selain itu, terdapat dua profag besar (32.996 bp dan 36.093 bp), salah satunya mengandung RNA-directed DNA polymerase. Dengan tujuh lokus CRISPR, *T. aquaticus* mempertahankan stabilitas genom dan melindungi diri dari virus termofilik, mendukung kelangsungan hidupnya di suhu tinggi (Brum *et al.*,2015).

6. Keunikan Gen *Thermus aquaticus*

Keunikan gen *Thermus aquaticus* terlihat dari kandungan GC yang tinggi, yang meningkatkan stabilitas termal karena ikatan G=C lebih kuat daripada A=T. Membran selnya mengandung lipid dan protein termostabil untuk bertahan di suhu ekstrem. Enzim Taq polymerase tetap aktif pada suhu tinggi 95°C dan digunakan dalam PCR berkat strukturnya yang kaku dengan ikatan hidrogen kuat serta fleksibilitas residu asam amino rendah. Genomnya juga memiliki dua prophage penuh dan dua parsial yang berperan dalam evolusi enzim termostabil, sementara sistem CRISPR menjaga stabilitas genom dari DNA asing dan virus termofilik (Brumm *et al.*, 2015).

Adapun keunikan lainnya dari genom *Thermus aquaticus* dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 1. Keunikan Genom *Thermus aquaticus*

Gen	Keunikan	Referensi
Malate Dehydrogenase (MDH)	Gen MDH <i>T. aquaticus</i> diekspresikan dalam <i>E. coli</i> dengan optimasi sinyal transkripsi dan translasi, menghasilkan ekspresi hingga 40-50% dari protein sel larut. Enzim ini kemudian dipurifikasi melalui perlakuan panas	Allread., <i>et al</i> (1992) Nicholls., <i>et al</i> (1990)
Amylomaltase	Gen amyломaltase <i>T. aquaticus</i> menghasilkan enzim aktif pada 75°C dan stabil hingga 85°C, dengan aktivitas transglukosilasi unik dibandingkan enzim di <i>E. coli</i> dan tanaman	Terada., <i>et al</i> (1999)
RNA Polymerase	RNA polymerase dari <i>T. aquaticus</i> memiliki efisiensi terminasi transkripsi yang lebih rendah dan resistensi tinggi terhadap rifampin dibandingkan dengan <i>E. coli</i> . Enzim ini juga menunjukkan tingkat pemotongan transkrip intrinsik yang tinggi	Minakhin., <i>et al</i> (2021)
Isocitrate Dehydrogenase	Gen ini menunjukkan stabilitas termal yang tinggi dan memiliki kesamaan struktur dengan enzim dari bakteri lain, meskipun dengan tingkat kesamaan yang bervariasi	Miyazaki, K. (1996).
3-Isopropylmalate Dehydrogenase	Gen ini menunjukkan stabilitas yang unik pada suhu tinggi, dengan homologi tinggi terhadap gen dari <i>T. thermophiles</i>	Kirino, H., & Oshima, T. (1991).
DNA Polymerase	DNA polymerase dari <i>T. aquaticus</i> dikenal karena stabilitas termalnya yang tinggi, yang sangat berguna dalam reaksi rantai polimerase (PCR)	Lawyer., <i>et al</i> 1989
RecA Protein	Protein RecA dari <i>T. aquaticus</i> menunjukkan aktivitas ATPase yang optimal di atas 70°C dan memiliki kesamaan struktural dengan <i>E. coli</i> RecA, meskipun ada perbedaan dalam urutan asam amino	Angov & Camerini. (1994)

Tabel diatas menunjukkan bahwa *Thermus aquaticus* mempunyai banyak sekali keunikan dan karakteristik tertentu yang berkaitan dengan genomnya dimana dari berbagai keunikan tersebut salah satu yang paling terkenal yaitu kemampuannya dalam menghasilkan enzim yang dikenal dengan Taq polymerase yang digunakan dalam teknologi PCR.

7. Taq polymerase

Thermus aquaticus terkenal karena enzim Taq polymerase, yang memiliki

stabilitas tinggi terhadap suhu tinggi. Hal ini membuatnya ideal untuk replikasi DNA dalam PCR, karena dapat bertahan pada suhu denaturasi DNA 95°C . Enzim ini pertama kali dimurnikan pada tahun 1976 dan kemudian dipatenkan oleh Cetus Corporation pada tahun 1989 karena penggunaannya yang luas dalam PCR (Kim & Park, 2014).

Taq DNA polymerase bersifat termostabil, memungkinkan aktivitas enzimatik pada suhu tinggi yang penting untuk PCR. Enzim ini bekerja cepat dan

prosesif, meski tanpa aktivitas 3'-eksonuklease untuk proofreading. Banyak digunakan dalam sequencing dan PCR, Taq polymerase memungkinkan pembacaan produk panjang dengan intensitas seragam serta amplifikasi DNA yang efisien, mendukung proyek sequencing skala besar (Innis et al., 1998; Kim *et al.*, 1995; Sadeghi et al., 2007).

Meskipun Taq DNA polymerase tidak memiliki aktivitas proofreading 3'-5', enzim ini dapat melakukan sintesis DNA dengan tingkat kesalahan yang relatif rendah. Kesalahan substitusi basa terjadi pada tingkat 1 per 9.000 nukleotida, sementara kesalahan frameshift terjadi pada frekuensi 1 per 41.0003. Struktur kristal Taq DNA polymerase menunjukkan kesamaan dengan DNA polymerase I dari *Escherichia coli*, meskipun domain pengeditan 3'-5' eksonuklease hilang (Tindall & Kunkel, 1988).

8. Pemanfaatan *Thermus aquaticus*

Thermus aquaticus memiliki berbagai aplikasi penting dalam bioteknologi, industri, dan lingkungan. Enzim-enzim yang dihasilkan oleh bakteri ini, seperti Taq polimerase dan NADH oksidase, memberikan kontribusi besar dalam teknik PCR, sensor amperometrik, dan pengolahan limbah. Selain itu, kemampuannya dalam oksidasi arsenit dan biodegradasi senyawa organik menjadikannya alat yang berharga dalam pengelolaan lingkungan (López., et al 2011; Domínguez., et al 2007; López., et al 2012).

KESIMPULAN DAN SARAN

Penemuan *Thermus aquaticus* oleh Dr. Thomas Brock pada tahun 1966 menjadi tonggak penting dalam mikrobiologi, terutama karena bakteri ini mampu bertahan di lingkungan bersuhu tinggi. Kemampuannya menghasilkan enzim Taq polymerase yang stabil pada suhu tinggi telah merevolusi teknik Polymerase Chain Reaction (PCR), memungkinkan berbagai kemajuan dalam bidang genetika, kedokteran, dan forensik. Karakteristik

uniknya, termasuk dinding sel yang kuat, kandungan GC genom yang tinggi, serta metabolisme yang fleksibel, menjadikannya model penting dalam studi ekstremofili. Selain aplikasinya dalam PCR, *T. aquaticus* juga memiliki potensi dalam bioteknologi dan industri, menunjukkan bahwa mikroorganisme dari lingkungan ekstrem dapat memberikan manfaat besar dalam sains dan teknologi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya mengucapkan terima kasih kepada Ibunda Prof. Dr. Ir. Yusminah Hala, M.S. atas bimbingan dan arahan dalam penyusunan artikel ini. Juga kepada semua pihak yang telah membantu, baik dalam penyediaan referensi maupun diskusi, sehingga artikel ini dapat terselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- Alldread, R., Nicholls, D., Sundaram, T., Scawen, M., & Atkinson, T. (1992). Overexpression of the *Thermus aquaticus* B malate dehydrogenase-encoding gene in *Escherichia coli*. *Gene*, 114 1, 139-43 .
[https://doi.org/10.1016/0378-1119\(92\)90720-A](https://doi.org/10.1016/0378-1119(92)90720-A)
- Angov, E., & Camerini-Otero, R. (1994). The *recA* gene from the thermophile *Thermus aquaticus* YT-1: cloning, expression, and characterization. *Journal of Bacteriology*, 176, 1405 - 1412.
<https://doi.org/10.1128/jb.176.5.1405-1412.1994>.
- Brock, T. D. (1978). *Thermophilic Microorganisms and Life at High Temperatures*. Springer-Verlag.
- Brock, T. D. (1969). Microbial Growth at High Temperatures: Thermophilic Bacteria in Hot Springs. *Journal of Bacteriology*, 98(1), 289-297.
- Brock, T. D., & Freeze, H. (1969). *Thermus aquaticus* gen. n. and sp. n., a nonsporulating extreme thermophile. *Journal of bacteriology*, 98(1), 289-297.

- Bayer, M. E. 1967. Response of cell walls of *Escherichia coli* to a sudden reduction of the environmental osmotic pressure. *J. Bacteriol.* 93:1104-1112.
- Brumm, P. J., Monsma, S., Keough, B., Jasinovica, S., Ferguson, E., Schoenfeld, T., Lodes, M., & Mead, D. A. (2015). Complete Genome Sequence of *Thermus aquaticus* Y51MC23. *PLOS ONE*, 10(10), e0138674.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138674>
- Dustin, R. (2005). Advances in Thermostable Enzymes: Applications in Industry and Research. *BioTech Journal*, 22(4), 112-125.
- Degryse, E., & Glansdorff, N. (1981). Studies on the central metabolism of *Thermus aquaticus*, an extreme thermophilic bacterium: anaplerotic reactions and their regulation. *Archives of Microbiology*, 129, 173-177.
- Domínguez, A., Fuciños, P., Rúa, M., Pastrana, L., Longo, M., & Sanromán, M. (2007). Stimulation of novel thermostable extracellular lipolytic enzyme in cultures of *Thermus* sp. *Enzyme and Microbial Technology*, 40, 187-194.
<https://doi.org/10.1016/J.ENZMICTEC.2006.09.006>.
- Edwards, M. R., and R. W. Stevens. (1963). Fine structure of *Listeria monocytogenes*. *J. Bacteriol.* 86:414-428.
- Innis, M., Myambo, K., Gelfand, D., & Brow, M. (1988). DNA sequencing with *Thermus aquaticus* DNA polymerase and direct sequencing of polymerase chain reaction-amplified DNA.. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 85 24, 9436-40 .
<https://doi.org/10.1073/PNAS.85.24.9436>.
- Kirino, H., & Oshima, T. (1991). Molecular cloning and nucleotide sequence of 3-isopropylmalate dehydrogenase gene (*leuB*) from an extreme thermophile, *Thermus aquaticus* YT-1.. *Journal of biochemistry*, 109 6, 852
- Kim, S. G., & Park, J. T. (2014). Production of DNA polymerase from *Thermus aquaticus* in recombinant *Escherichia coli*. *Korean Journal of Agricultural Science*, 41(3), 245-249.
- Lawyer, F., Stoffel, S., Saikit, R., Myambo, K., Drummond, R., & Gelfand, D. (1989). Isolation, characterization, and expression in *Escherichia coli* of the DNA polymerase gene from *Thermus aquaticus*. *The Journal of biological chemistry*, 264 11, 6427-37 .
[https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(18\)83367-1](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(18)83367-1)
- López, E., Alonso, B., Deive, F., Sanromán, M., & Longo, M. (2011). On the hyperthermostability of lipolytic enzymes from *Thermus aquaticus* YT-1: exploring their application to polymer degradation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 86, 838-844.
<https://doi.org/10.1002/JCTB.2597>.
- López, E., Domínguez, B., Deive, F., Sanromán, M., & Longo, M. (2012). Scaling-up the production of thermostable lipolytic enzymes from *Thermus aquaticus* YT1. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 35, 1011-1022.
<https://doi.org/10.1007/s00449-012-0686-4>.
- Mangrola, A. (2021). *Extremophiles and Their Applications in Biotechnology*. Springer Nature.
- Mangrola, A., et al. (2021). Genome Sequencing and Thermophilic Adaptation of *Thermus Aquaticus*. *Microbial Ecology*, 73(2), 215-230.
- Montana State University Thermal Biology Institute & Montana Institute on Ecosystems. (n.d.). *Living Colors: Microbes of Yellowstone National Park*. diakses 5 Maret 2025, dari

- <https://tbi.montana.edu/LivingColors.html>.
- Minakhin, L., Nechaev, S., Campbell, E., & Severinov, K. (2001). Recombinant *Thermus aquaticus* RNA Polymerase, a New Tool for Structure-Based Analysis of Transcription. *Journal of Bacteriology*, 183, 71 - 76. <https://doi.org/10.1128/JB.183.1.71-76.2001>
- Miyazaki, K. (1996). Isocitrate dehydrogenase from *Thermus aquaticus* YT1: purification of the enzyme and cloning, sequencing, and expression of the gene. *Applied and Environmental Microbiology*, 62, 4627 - 4631. <https://doi.org/10.1128/aem.62.12.4627-4631.1996>.
- Nicholls, D., Sundaram, T., Atkinson, T., & Minton, N. (1990). Cloning and nucleotide sequences of the *mdh* and *sucD* genes from *Thermus aquaticus* B.. *FEMS microbiology letters*, 58 1, 7-14 . [https://doi.org/10.1016/0378-1097\(90\)90093-6](https://doi.org/10.1016/0378-1097(90)90093-6).
- Sadeghi, H., Rabbani, M., & Moazen, F. (2007). Amplification and cloning of Taq DNA polymerase gene from *Thermus Aquaticus* strain YT-1. *Research in Pharmaceutical Sciences*, 1, 49-52.
- Tindall, K., & Kunkel, T. (1988). Fidelity of DNA synthesis by the *Thermus aquaticus* DNA polymerase.. *Biochemistry*, 27 16, 6008-13 . <https://doi.org/10.1021/BI00416A027>.
- Terada, Y., Fujii, K., Takaha, T., & Okada, S. (1999). *Thermus aquaticus* ATCC 33923 Amylomaltase Gene Cloning and Expression and Enzyme Characterization: Production of Cycloamylose. *Applied and Environmental Microbiology*, 65, 910 - 915. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.3.910-915.1999>.
- Zeikus, J. G., M. W. Taylor, and T. D. Brock. 1970. Thermal stability of ribosomes and ribonucleic acid from *Thermus aquaticus*. *Biochim. Biophys. Acta* 204:512-520.