

Termofile

“Jak ogień trawiący lasy, gdy burza pędzi płomień, tak płonęły pola trojańskie.”

– Homer, *Illiada*

Termofile to organizmy zdolne do życia i wzrostu w środowiskach o ekstremalnie wysokich temperaturach, które dla większości organizmów stanowią warunki śmiertelne. Najczęściej są to mikroorganizmy, przede wszystkim bakterie i archeony, które występują w takich miejscach jak gorące źródła, wulkany podwodne czy sztuczne środowiska przemysłowe. Badanie termofilów pozwala lepiej zrozumieć granice adaptacji biologicznych oraz otwiera szerokie perspektywy w biotechnologii.

Środowiska termofilne

Termofile zasiedlają naturalne i sztuczne środowiska charakteryzujące się wysoką temperaturą, często połączoną z innymi ekstremalnymi czynnikami, np. wysokim ciśnieniem, kwaśnym pH lub wysokim zasoleniem. [1]

Gorące źródła i gejzery

Znane miejsca występowania termofilów to m.in. gorące źródła w Parku Narodowym Yellowstone (USA), na Islandii, Kamczatce czy w Nowej Zelandii. Temperatura w tych środowiskach może dochodzić do 90–100°C, a pH często jest silnie kwaśne (pH 2–3). [2]

Wulkany podwodne i kominy hydrotermalne

W głębinach oceanicznych, np. na dnie Rowu Mariańskiego czy w pobliżu grzbietów śródoceanicznych, znajdują się kominy hydrotermalne emitujące wodę o temperaturze nawet 350–400°C pod bardzo wysokim ciśnieniem. W tych ekstremalnych warunkach rozwijają się unikalne ekosystemy oparte na chemolitotrofii. [3]

Środowiska antropogeniczne

Termofile mogą również kolonizować piece przemysłowe, zbiorniki fermentacyjne czy instalacje chemiczne, gdzie wysokie temperatury są normą. Ich zdolność do rozkładu związków organicznych i chemicznych pod wpływem ciepła ma zastosowanie w bioremediacji.

Przykłady termofili

Thermus aquaticus

Bakteria *Thermus aquaticus* to jedna z najlepiej poznanych termofili, która została odkryta w gorących źródłach Yellowstone [4]. Enzym Taq polimeraza, izolowany z tej bakterii, umożliwia amplifikację DNA w technice PCR (reakcja łańcuchowa polimerazy), rewolucjonizując badania genetyczne i diagnostykę molekularną [5].

Archeony z rodzaju *Sulfolobus*

Archeony *Sulfolobus* żyją w kwaśnych gorących źródłach o temperaturach około 80°C i pH około 2–3. Są zdolne do utleniania siarki, co stanowi podstawę ich metabolizmu chemolitotroficznego [6]. *Sulfolobus* stanowią model do badania procesów adaptacji do ekstremalnych warunków kwasowości i wysokiej temperatury [7].

Pyrococcus* i *Thermococcus

Te archeony to hipertermofile – organizmy preferujące temperatury powyżej 80°C, a niektóre gatunki rozwijają się optymalnie w temperaturach powyżej 100°C. Są izolowane z kominów hydrotermalnych głębin oceanicznych i charakteryzują się metabolizmem opartym na fermentacji i oddychaniu siarkowym. [8, 9]

Mechanizmy adaptacji do wysokich temperatur

Wysoka temperatura stanowi poważne wyzwanie dla stabilności struktur biomolekularnych. U termofilów występuje szereg adaptacji na poziomie molekularnym i komórkowym [10-14]:

Stabilizacja białek i enzymów

- Zwiększona liczba mostków disiarczkowych i wiązań jonowych w białkach, co zwiększa ich stabilność termiczną.
- Zwiększona gęstość hydrofobowa w rdzeniu białka, co ogranicza denaturację pod wpływem ciepła.
- Obecność specjalnych chaperonów (białek opiekuńczych), które pomagają w utrzymaniu prawidłowej konformacji białek.

Ochrona DNA

- Wzrost zawartości cytozyny w DNA, co zwiększa stabilność termiczną dwuniciowej struktury DNA.
- Obecność białek chroniących DNA (np. histonopodobnych w archeonach), a także wysoko wydajne systemy naprawy DNA.

Modyfikacje błon komórkowych

- Obecność unikalnych tetraeterowych lipidów monomolekularnych (w archeonach), które tworzą błony bardziej odporne na rozpad termiczny.
- Zwiększona zawartość nasyconych kwasów tłuszczowych w lipidach błonowych bakterii, co zwiększa ich stabilność.

Produkcja stabilizatorów komórkowych

- Niektóre termofile syntetyzują cząsteczki osmotycznie czynne i stabilizujące, takie jak trehaloza, które chronią białka i błony przed destabilizacją termiczną.

Znaczenie termofili

Biotechnologia

Enzymy termofilne wykorzystywane są m.in. w:

- diagnostyce molekularnej (np. PCR) [5];
- produkcji biopaliw, gdzie stabilność enzymów w wysokiej temperaturze pozwala na efektywną konwersję biomasy [15];
- przemyśle chemicznym i spożywczym, gdzie często panują ekstremalne warunki zachodzących procesów [16].

Ekologia i ewolucja

Termofile są kluczowymi organizmami w ekosystemach geotermalnych i głębinowych. Ich obecność pozwala badać hipotezy dotyczące powstania życia na Ziemi w warunkach pierwotnej planety, gdzie panujące wysokie temperatury mogły sprzyjać rozwojowi życia termofilnego. [17]

Podsumowanie

Termofile to organizmy wyjątkowe pod względem przystosowań do życia w gorących, ekstremalnych środowiskach. Ich badanie poszerza naszą wiedzę o granicach życia oraz umożliwia zastosowanie unikalnych mechanizmów biologicznych w nowoczesnej biotechnologii i medycynie.

1. Rampelotto PH. Extremophiles and extreme environments. *Life* (Basel). 2013 Aug 7;3(3):482-5.
2. Massello FL, Chan CS, Chan KG, Goh KM, Donati E, Urbietta MS. Meta-Analysis of Microbial Communities in Hot Springs: Recurrent Taxa and Complex Shaping Factors beyond pH and Temperature. *Microorganisms*. 2020 Jun 16;8(6):906.
3. Zierenberg RA, Adams MW, Arp AJ. Life in extreme environments: hydrothermal vents. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2000 Nov 21;97(24):12961-2.
4. Brock TD, Edwards MR. Fine structure of *Thermus aquaticus*, an extreme thermophile. *J Bacteriol*. 1970 Oct;104(1):509-17.
5. Ishino S, Ishino Y. DNA polymerases as useful reagents for biotechnology - the history of developmental research in the field. *Front Microbiol*. 2014 Aug 29;5:465.
6. Quehenberger J, Shen L, Albers SV, Siebers B, Spadiut O. *Sulfolobus* - A Potential Key Organism in Future Biotechnology. *Front Microbiol*. 2017 Dec 12;8:2474.
7. Chen L, Brügger K, Skovgaard M, Redder P, She Q, Torarinsson E, Greve B, Awayez M, Zibat A, Klenk HP, Garrett RA. The genome of *Sulfolobus acidocaldarius*, a model organism of the Crenarchaeota. *J Bacteriol*. 2005 Jul;187(14):4992-9.
8. Schut GJ, Bridger SL, Adams MW. Insights into the metabolism of elemental sulfur by the hyperthermophilic archaeon *Pyrococcus furiosus*: characterization of a coenzyme A- dependent NAD(P)H sulfur oxidoreductase. *J Bacteriol*. 2007 Jun;189(12):4431-41.
9. Price MT, Fullerton H, Moyer CL. Biogeography and evolution of *Thermococcus* isolates from hydrothermal vent systems of the Pacific. *Front Microbiol*. 2015 Sep 24;6:968.
10. Sterner R, Liebl W. Thermophilic adaptation of proteins. *Crit Rev Biochem Mol Biol*. 2001;36(1):39-106.
11. Berezovsky IN, Shakhnovich EI. Physics and evolution of thermophilic adaptation. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2005 Sep 6;102(36):12742-7.
12. Hickey DA, Singer GA. Genomic and proteomic adaptations to growth at high temperature. *Genome Biol*. 2004;5(10):117.
13. Koga Y. Thermal adaptation of the archaeal and bacterial lipid membranes. *Archaea*. 2012;2012:789652.

14. Terui Y, Ohnuma M, Hiraga K, Kawashima E, Oshima T. Stabilization of nucleic acids by unusual polyamines produced by an extreme thermophile, *Thermus thermophilus*. *Biochem J*. 2005 Jun 1;388(Pt 2):427-33.
15. Barnard D, Casanueva A, Tuffin M, Cowan D. Extremophiles in biofuel synthesis. *Environ Technol*. 2010 Jul-Aug;31(8-9):871-88.
16. Ashaolu TJ, Malik T, Soni R, Prieto MA, Jafari SM. Extremophilic Microorganisms as a Source of Emerging Enzymes for the Food Industry: A Review. *Food Sci Nutr*. 2024 Dec 30;13(1):e4540.
17. Cowan DA, Albers SV, Antranikian G, Atomi H, Averhoff B, Basen M, Driessen AJM, Jebbar M, Kelman Z, Kerou M, Littlechild J, Müller V, Schönheit P, Siebers B, Vorgias K. Extremophiles in a changing world. *Extremophiles*. 2024 Apr 29;28(2):26.