

Halofile

“Smak soli na ustach był smakiem życia.”

– Ernest Hemingway, *Stary człowiek i morze*

Halofile to organizmy przystosowane do życia w środowiskach o bardzo wysokim zasoleniu, często przekraczającym zasolenie wody morskiej (około 3,5% NaCl). Mogą to być bakterie, archeony, a także niektóre eukarionty, takie jak glony czy grzyby. Zasolenie stanowi dla organizmów poważne wyzwanie, głównie ze względu na ryzyko odwodnienia i zaburzeń osmotycznych. Mimo to halofile nie tylko przetrwają, ale i rozwijają się w solniskach, słonych jeziorach, morzach zamkniętych oraz zasolonych glebach. [1]

Środowiska życia halofili

Typowe środowiska halofilne [1, 2]:

- **Solniska i słone jeziora** – np. Morze Martwe, Wielkie Słone Jezioro (USA), Słone Jezioro w Turcji. Zasolenie tych wód może sięgać od 10% do ponad 30% NaCl.
- **Morza zamknięte** – wody, które w wyniku dużej ewaporacji mają znacznie wyższe zasolenie niż typowe oceany, np. Morze Czerwone czy Zatoka Perska.
- **Zasolone gleby i osady** – obszary, gdzie zasolenie może ograniczać rozwój większości roślin i organizmów, lecz sprzyja rozwojowi halofilnych mikroorganizmów.

Przykłady halofili

Archeony z rodziny *Halobacteriaceae*

To najbardziej znane halofile, zdolne do życia w ekstremalnych zasoleniach (nawet do 30% NaCl). Są one często różowo-czerwone lub fioletowe dzięki obecności pigmentów takich jak bakteriorodopsyna, które dodatkowo pełnią funkcję fotoreceptorów. [3]

Bakterie halofilne

Z rodzaju *Salinibacter* oraz *Halomonas* – bakterie te występują w słonych jeziorach i solniskach, wykorzystując mechanizmy osmoregulacyjne do tolerancji wysokiego zasolenia [4, 5].

Eukarionty halofilne

Niektóre glony z rodzaju *Dunaliella* czy grzyby halotolerancyjne również rozwijają się w słonych środowiskach, wykorzystując specyficzne mechanizmy adaptacyjne [6-8].

Mechanizmy adaptacji halofili

Życie w warunkach wysokiego zasolenia wymaga przeciwdziałania efektom odwodnienia i szkodliwym wpływom jonów soli.

Strategia „soli wewnętrznej”

Halofile często gromadzą wewnątrzkomórkowo duże ilości jonów potasu (K^+) i innych jonów, które wyrównują gradient osmotyczny z otoczeniem. Taka strategia wymaga specjalnej adaptacji białek komórkowych, aby mogły funkcjonować w wysokim stężeniu jonów. [9]

Akumulacja osmolitów organicznych

Alternatywnie lub dodatkowo, halofile syntetyzują lub gromadzą małe, nierozpuszczalne w wodzie cząsteczki, takie jak gliceryna, trehaloza, betaina czy aminokwasy (np. prolina), które regulują osmotyczność komórki bez zakłócania funkcji białek [10].

Specjalne modyfikacje białek i enzymów

Białka halofili wykazują unikalną powierzchniową strukturę, np. wzrost liczby reszt kwasowych, co zwiększa ich rozpuszczalność i stabilność w środowiskach o wysokim zasoleniu [11, 12].

Mechanizmy ochrony DNA

Halofile wykazują podwyższoną aktywność systemów naprawy DNA oraz mechanizmy ochrony przed stresem oksydacyjnym wywołanym przez intensywne nasłonecznienie, często występujące w słonych środowiskach [13, 14].

Znaczenie biotechnologiczne halofili

Halofile i ich enzymy wykazują wyjątkową stabilność w warunkach wysokiego zasolenia oraz zmiennych warunkach środowiskowych, co czyni je wartościowymi dla przemysłu i nauki.

Produkcja enzymów halostabilnych

Enzymy takie jak proteazy, lipazy czy amylazy halofilne są wykorzystywane w przemyśle spożywczym, detergentowym, chemicznym oraz w bioremediacji środowisk zasolonych [12, 15].

Produkcja biopigmentów

Bakteriorodopsyna i inne pigmenty halofilne mają zastosowanie w fotonice, optoelektronice, a także w medycynie jako potencjalne środki terapeutyczne [16].

Bioremediacja

Halofile mogą być wykorzystywane do oczyszczania środowisk zasolonych, m.in. w usuwaniu metali ciężkich i rozkładzie zanieczyszczeń organicznych w warunkach, gdzie większość mikroorganizmów nie przetrwa [17].

Podsumowanie

Halofile są przykładem niezwykle plastyczności życia, które potrafi przetrwać i rozwijać się w środowiskach o bardzo wysokim zasoleniu. Ich adaptacje molekularne i metaboliczne są źródłem cennych informacji dla nauki oraz inspiracją dla innowacyjnych technologii biotechnologicznych.

1. Ma Y, Galinski EA, Grant WD, Oren A, Ventosa A. Halophiles 2010: life in saline environments. *Appl Environ Microbiol.* 2010 Nov;76(21):6971-81.
2. Oren A. Diversity of halophilic microorganisms: environments, phylogeny, physiology, and applications. *J Ind Microbiol Biotechnol.* 2002 Jan;28(1):56-63.
3. Kennedy SP, Ng WV, Salzberg SL, Hood L, DasSarma S. Understanding the adaptation of *Halobacterium* species NRC-1 to its extreme environment through computational analysis of its genome sequence. *Genome Res.* 2001 Oct;11(10):1641-50.
4. Antón J, Oren A, Benlloch S, Rodríguez-Valera F, Amann R, Rosselló-Mora R. *Salinibacter ruber* gen. nov., sp. nov., a novel, extremely halophilic member of the Bacteria from saltern crystallizer ponds. *Int J Syst Evol Microbiol.* 2002 Mar;52(Pt 2):485-91.
5. Ye JW, Chen GQ. *Halomonas* as a chassis. *Essays Biochem.* 2021 Jul 26;65(2):393-403.
6. Hyrslova I, Krausova G, Mrvikova I, Stankova B, Branyik T, Malinska H, Huttli M, Kana A, Daskocil I. Functional Properties of *Dunaliella salina* and Its Positive Effect on Probiotics. *Mar Drugs.* 2022 Dec 15;20(12):781.
7. Petrovic U, Gunde-Cimerman N, Plemenitas A. Cellular responses to environmental salinity in the halophilic black yeast *Hortaea werneckii*. *Mol Microbiol.* 2002 Aug;45(3):665-72.
8. Ben Hmad I, Gargouri A. Halophilic filamentous fungi and their enzymes: Potential biotechnological applications. *J Biotechnol.* 2024 Feb 10;381:11-18.
9. Ionescu D, Zoccarato L, Cabello-Yeves PJ, Tikochinski Y. Extreme fluctuations in ambient salinity select for bacteria with a hybrid "salt-in"/"salt-out" osmoregulation strategy. *Front Microbiomes.* 2024 Jan 8;2:1329925.
10. Roberts MF. Organic compatible solutes of halotolerant and halophilic microorganisms. *Saline Syst.* 2005 Aug 4;1:5.
11. Arakawa T, Yamaguchi R, Tokunaga H, Tokunaga M. Unique Features of Halophilic Proteins. *Curr Protein Pept Sci.* 2017;18(1):65-71.
12. DasSarma S, DasSarma P. Halophiles and their enzymes: negativity put to good use. *Curr Opin Microbiol.* 2015 Jun;25:120-6.
13. Takahashi M, Takahashi E, Joudeh LI, Marini M, Das G, Elshenawy MM, Akal A, Sakashita K, Alam I, Tehseen M, Sobhy MA, Stingl U, Merzaban JS, Di Fabrizio E, Hamdan SM. Dynamic structure mediates halophilic adaptation of a DNA polymerase from the deep-sea brines of the Red Sea. *FASEB J.* 2018 Jun;32(6):3346-3360.
14. Kutnowski N, Shmulevich F, Davidov G, Shahar A, Bar-Zvi D, Eichler J, Zarivach R, Shaanan B. Specificity of protein-DNA interactions in hypersaline environment: structural studies on complexes of *Halobacterium salinarum* oxidative stress-dependent protein HsRosR. *Nucleic Acids Res.* 2019 Sep 19;47(16):8860-8873.
15. Ebrahimie E, Ebrahimi M, Sarvestani NR, Ebrahimi M. Protein attributes contribute to halo-stability, bioinformatics approach. *Saline Syst.* 2011 May 18;7(1):1.
16. Silva-Castro GA, Moyo AC, Khumalo L, van Zyl LJ, Petrik LF, Trindade M. Factors influencing pigment production by halophilic bacteria and its effect on brine evaporation rates. *Microb Biotechnol.* 2019 Mar;12(2):334-345.
17. Rezaei Z, Amoozegar MA, Moghimi H. Innovative approaches in bioremediation: the role of halophilic microorganisms in mitigating hydrocarbons, toxic metals, and microplastics in hypersaline environments. *Microb Cell Fact.* 2025 Aug 14;24(1):184. doi: 10.1186/s12934-025-02817-7. Erratum in: *Microb Cell Fact.* 2025 Nov 14;24(1):236.