

Pigmen aktinomiset: potensi dan pemanfaatannya di berbagai bidang

Actinomycete pigments: potential and applications across various fields

Widya Esti Purwaningtyas^{1*}, Siti Sholekha², Uci Cahlia³

^{1*})Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana Kampus Bukit Jimbaran, Kuta Selatan, Bali 80361, Indonesia

²)Program Studi S1 Biologi Terapan, Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung, Lampung 35141, Indonesia

³)Program Studi S-1 Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu, Jl. W.R Supratman, Kandang Limun, Bengkulu 38371, Indonesia

Email : widya_esti@unud.ac.id

Disubmit: 20 November 2025, direvisi: 31 Januari 2026, diterima: 31 Januari 2026

Doi : 10.30862/cassowary.cs.v9.1.510

ABSTRACT: *Synthetic pigments are increasingly scrutinized due to concerns over toxicity, bioaccumulation, and environmental pollution, which has intensified global interest in natural pigments as safer and more environmentally responsible alternatives. Among microbial producers, actinomycetes stand out as a highly promising source because they are capable of synthesizing a wide spectrum of pigments, including melanin, prodigiosin, carotenoids, actinorhodin, and other chromogenic metabolites that function not only as coloring agents but also exhibit valuable biological activities such as antimicrobial, antioxidant, photoprotective, and anticancer effects. These multifunctional properties expand their relevance across numerous fields, including food, cosmetics, textiles, pharmaceuticals, agriculture, and biotechnology. Despite this broad potential, large-scale utilization of actinomycete-derived pigments remains constrained by challenges such as low or inconsistent yields, variability in pigment quality, relatively high production costs, and the need for complex downstream purification. Advances in fermentation optimization, the development of cost-effective substrates, and the application of metabolic and genetic engineering are helping to address these limitations and improve production feasibility. In this context, the present review aims to provide an overview of pigment types produced by actinomycetes, highlight their functional and industrial applications, and discuss the key obstacles and future prospects for their development as competitive natural colorants.*

Keywords: *actinomycetes, microbial pigments, natural colorants, bioactivity, applications.*

PENDAHULUAN

Pigmen telah memainkan peran penting dalam perkembangan budaya dan karya seni manusia sejak zaman kuno, sebagaimana terlihat pada lukisan gua prasejarah yang diperkirakan berusia sekitar 40.000 tahun (Diaz *et al.*, 2025). Peran tersebut tidak hanya terbatas pada konteks historis dan artistik, tetapi juga berlanjut hingga kehidupan modern. Kehadiran pigmen memengaruhi berbagai aspek keseharian, mulai dari pemilihan pakaian, desain interior rumah, hingga daya tarik visual pada makanan yang kita konsumsi (Rao *et al.*, 2017).

Seiring meningkatnya kesadaran global mengenai isu keberlanjutan, kekhawatiran tersebut menjadi titik balik yang mendorong pencarian alternatif pewarna yang lebih aman bagi manusia maupun lingkungan. Tren ini memacu pengembangan pigmen berbasis organisme hidup dan senyawa non-toksik yang selaras dengan regulasi modern serta preferensi konsumen terhadap produk ramah lingkungan (Diez *et al.*, 2025).

Sumber utama pigmen alami berasal dari tumbuhan serta berbagai mikroorganisme, termasuk bakteri dan cendawan. Aktinomiset merupakan kelompok bakteri Gram-positif yang tersebar luas dan heterogen, ditandai dengan morfologi seperti jamur serta kandungan GC yang tinggi (>55 mol %). Kelompok ini menunjukkan keragaman fisiologis yang besar, termasuk kemampuan untuk memproduksi, mensintesis, dan mensekresikan berbagai metabolit primer maupun sekunder (Fernandes *et al.*, 2021). Aktinomiset memiliki potensi bioteknologi tinggi karena mampu menghasilkan berbagai pigmen alami. Organisme ini dapat membentuk pigmen yang tersimpan di dalam miselium atau dilepaskan ke medium, tergantung pada spesies dan

kondisi pertumbuhan (Selim *et al.*, 2021). Ragam warnanya cukup luas, mulai dari melanin berwarna hitam atau coklat yang diproduksi oleh *Streptomyces glaucescens*, karotenoid kuning hingga oranye dari *Streptomyces albidoflavus*, pigmen merah prodigiosin dari *Streptomyces coelicolor*, hingga actinorhodin berwarna biru yang juga dihasilkan oleh spesies yang sama (Diez *et al.*, 2025). Selain *Streptomyces*, sejumlah genus lain seperti *Nocardia*, *Thermomonospora*, *Microbispora*, *Streptosporangium*, *Rhodococcus*, dan *Kitasatospora* juga diketahui memproduksi berbagai jenis pigmen dengan karakteristik berbeda (Celedón *et al.*, 2021).

Pigmen dari aktinomiset digunakan dalam industri tekstil, pangan, kosmetik, farmasi, pakan ternak, serta berbagai aplikasi lainnya, namun beberapa juga menunjukkan aktivitas biologis penting, termasuk sifat antimikroba, antioksidan, dan antikanker (Venil *et al.*, 2013). Pigmen seperti melanin, *quinone*, *violacein*, dan *indigoidine* terbukti memiliki potensi sebagai agen antimikroba, sementara kemampuan pigmen lain untuk bertindak sebagai bioindikator dan agen terapeutik semakin memperluas peluang pemanfaatannya. Dari beragam pigmen bakteri yang telah diidentifikasi, sejumlah di antaranya memiliki karakteristik yang menjanjikan untuk dikembangkan lebih lanjut dalam aplikasi biomedis dan industri Kesehatan (Celedón *et al.*, 2021). Keanekaragaman metabolik dan fleksibilitas produksi inilah yang menjadikan aktinomiset sebagai sumber pigmen alami yang prospektif dan menarik untuk penelitian serta pemanfaatan industri masa depan.

Melalui penelaahan mengenai karakteristik produksi pigmen, variasi metabolit yang dihasilkan, serta potensi aplikasinya pada berbagai sektor industri,

ulasan ini berupaya memperjelas peran aktinomiset sebagai sumber pigmen alami yang menjanjikan. Selain itu, kajian ini mengidentifikasi sejumlah tantangan ilmiah dan teknis yang masih perlu diatasi guna mendukung pengembangan dan pemanfaatan pigmen mikrobial pada skala yang lebih luas.

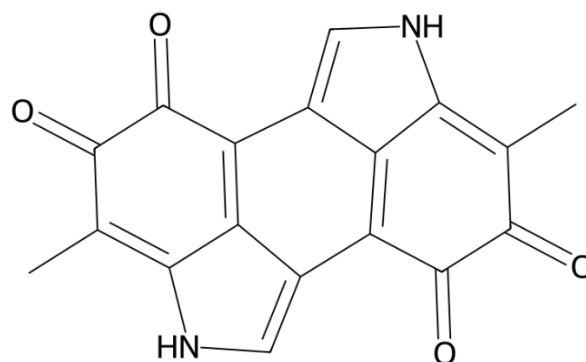
PIGMENT YANG DIHASILKAN OLEH AKTINOMISET

Aktinomiset dikenal sebagai kelompok mikroorganisme yang memiliki kemampuan biosintetik sangat luas, termasuk dalam menghasilkan berbagai jenis pigmen dengan warna dan sifat kimia yang beragam. Keragaman ini tidak hanya mencerminkan kompleksitas metabolisme sekunder mereka, tetapi juga membuka peluang pemanfaatan pigmen tersebut untuk aplikasi industri, pangan, maupun biomedis. Untuk memberikan gambaran awal mengenai variasi pigmen yang berhasil diidentifikasi dari kelompok ini, Tabel 1 menyajikan rangkuman jenis pigmen yang dihasilkan oleh berbagai spesies aktinomiset beserta karakteristik warnanya.

Melanin

Pigmen melanin yang dihasilkan oleh aktinomiset berwarna coklat hingga hitam. Melanin bermuatan negatif, hidrofobik, berat molekul tinggi dengan sifat amorf (Gambar 1) (Tarangini and Mishra, 2014). *Streptomyces* spp. adalah spesies aktinomiset yang banyak dipelajari dan dilaporkan untuk produksi melanin. Klasifikasi pigmen melanin didasarkan oleh komposisi kimianya, seperti *eumelanin*, *pheomelanin*, *pyomelanin*, dan *allomelanin*. Mayoritas melanin yang dihasilkan oleh mikroba dihasilkan melalui konversi senyawa tyrosine (jalur DOPA) atau *malonyl-coenzyme A* (jalur DHN) dengan bantuan enzim tertentu. Jalur DOPA diawali

dengan konversi *tyrosin* kemudian produksi prekursor *malonyl-coenzyme* Mikroorganisme yang menggunakan jalur DOPA lebih disukai untuk sintesis melanin dalam jumlah yang tinggi (Toledo *et al.*, 2017).



Gambar 1. Struktur kimia dari Melanin (ChemSketch)

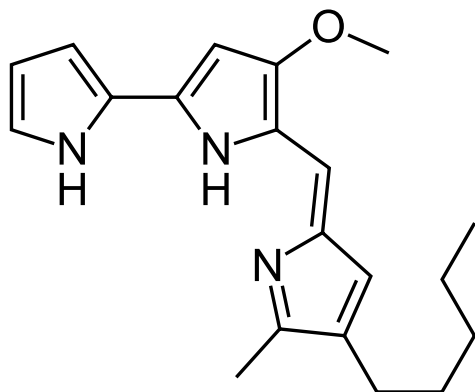
Prodigosin

Prodigosin ditandai oleh struktur pirolidipirometena yang umum (Gambar 2). Undesil prodigosin, streptorubin B, sikloprodigosin, dan metasikloprodigosin termasuk ke dalam pigmen prodigosin (Stankovic *et al.*, 2014). Mekanisme sintesis prodigosin sangat kompleks dan melibatkan banyak gen. Prodigosin dilaporkan memiliki beberapa aktivitas biologis penting yang bermanfaat, seperti immunosupresif dan antiproliferatif. Selain itu, prodigosin juga dapat diaplikasikan di industri tekstil dan kosmetik (Mnif *et al.*, 2022).

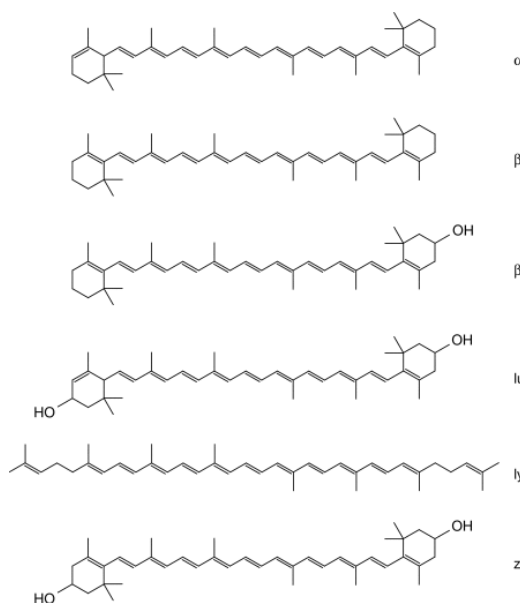
Karotenoid

Pigmen karotenoid yang dihasilkan oleh aktinomiset dapat berwarna kuning, oranye, hingga merah. Karotenoid yang dihasilkan oleh genus *Streptomyces* dapat berupa senyawa likopen, β -karoten, dan *astaxanthin* (Gambar 3) (Sandmann *et al.*, 2021). Karotenoid dikenal luas karena sifat antioksidannya, fungsi fotoprotektif, sebagai molekul struktural, serta memodulasi fluiditas membran (Maoka 2019). Biosintesis karotenoid merupakan

proses kompleks yang diatur oleh jalur-jalur rumit yang melibatkan berbagai enzim dan gen regulator. Jalur-jalur sintesis karotenoid telah dipelajari secara ekstensif pada beragam organisme, mulai dari bakteri, cendawan, hingga tumbuhan tingkat tinggi (Yuan *et al.*, 2015).



Gambar 2. Struktur kimia dari prodigiosin (ChemSketch)



Gambar 3. Struktur kimia dari 6 senyawa karotenoid (Ellison *et al.*, 2016).

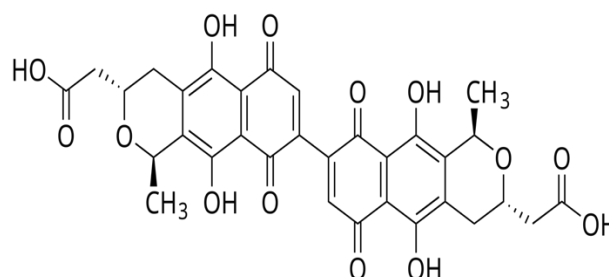
Aktinorhodin

Aktinorhodin merupakan metabolit sekunder berwarna biru yang dihasilkan oleh *S. coelicolor* dan telah banyak dimanfaatkan sebagai model utama dalam

penelitian genetika serta biokimia metabolisme sekunder. Senyawa ini memiliki tiga sifat kimia yang menonjol. Salah satunya adalah karakter warna yang berubah sesuai dengan kondisi pH. Selain itu, aktinorhodin memiliki aktivitas redoks yang memungkinkannya berperan dalam reaksi siklus redoks. Lebih lanjut, penelitian *in vitro* menunjukkan bahwa aktinorhodin mampu bertindak sebagai organokatalis pada reaksi oksidatif, dengan memfasilitasi reaksi antara L-asam askorbat dan L-sistein yang menghasilkan hidrogen peroksida (H_2O_2). Lebih lanjut, aktinorhodin juga dianggap sebagai model yang ideal untuk mengidentifikasi regulator yang berperan dalam produksi antibiotik (Mak and Nodwell, 2017; Xu *et al.*, 2019).

APLIKASI PIGMEN DARI AKTINOMISET

Aktinomiset termasuk kedalam mikroba yang memiliki nilai bioteknologi yang tinggi karena menghasilkan metabolit khusus dengan spektrum bioaktivitas yang luas. Pigmen yang berasal dari aktinomiset menarik karena berpotensi untuk digunakan dalam makanan, kosmetik, tekstil, dan farmasi. Potensi yang dimiliki oleh aktinomiset terletak pada kemampuannya untuk tumbuh pada substrat terbarukan dengan sifatnya yang *biodegradable*, berbeda dengan pigmen sintesis (Sarmiento-Tovar *et al.*, 2022).



Gambar 4. Struktur kimia dari actinorhodin (ChemSketch)

Tabel 1. Beberapa jenis pigmen yang dihasilkan oleh aktinomiset

No	Aktinomiset	Sumber	Pigmen	Potensi	Referensi
1	<i>Streptomyces torulosus</i>	Tanah	Melanin	Menghambat aflatoxin B1	Shaaban <i>et al.</i> , 2013
2	<i>Streptomyces</i> sp.	Sedimen Laut	Melanin	Antioksidan	Sheefaa and Shivaperumal, 2022
3	<i>Nocardioopsis</i> sp.	Sedimen Laut	Melanin	Antibakteri, antibiofilm, anti-quorum sensing	Kamarudheen <i>et al.</i> , 2019
4	<i>Streptomyces djakartensis</i> NSS-3	Tanah	Melanin	Aktivitas photoprotectif, antioksidan, antikanker, antimikroba	El-Zawawy <i>et al.</i> , 2024
5	<i>Streptomyces</i> sp. strain WMA-LM31	Tanah	Prodigiosin	Antioksidan dan antikanker	Sajjad <i>et al.</i> , 2018
6	<i>Streptomyces</i> sp.	Air laut, sedimen dan jaringan hewan	Prodigiosin	Antibakteri, antioksidan, pewarna makanan dan pewarnaan	Ramesh <i>et al.</i> , 2020
7	<i>Streptomyces</i> strain JAR6	Sampel serasah daun	Undecylprodigiosin	Antibakteri dan antikanker	Abraham and Chauhan, 2018
8	<i>Streptomyces</i> sp. VITGV38	Tomat (<i>Lycopersicon esculentum</i>).	Karotenoid	-	Pattapulavar <i>et al.</i> , 2025
9	<i>Gordonia amicalis</i> HS-11	Tanah terkontaminasi minyak	Karotenoid	Aktivitas antioksidan	Sowani <i>et al.</i> , 2016
10	<i>Streptomyces tauricus</i>	Tanah	Mirip Anthraquinone	Aktivitas antioksidan	Zhou <i>et al.</i> , 2024

Pigmen Aktinomiset sebagai Pewarna Alami

Pewarna banyak digunakan di berbagai industri seperti tekstil, makanan, cat, kosmetik, dan farmasi serta berperan dalam memberikan tampilan menarik pada produk. Dalam industri makanan, pewarna yang digunakan sebagai bahan tambahan memiliki peran penting karena berkaitan dengan masalah keamanan serta dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh pigmen buatan dan sintesis yang digunakan. Pigmen alami yang berasal dari mikroorganisme contohnya aktinomiset, secara farmakologis cenderung lebih aman dibandingkan pewarna sintetik. Pigmen alami yang diproduksi oleh aktinomiset memiliki efek sitotoksik yang sangat rendah dan kemungkinan dapat digunakan dalam industri makanan serta farmasi sebagai agen pewarna alami (Parmar and Singh 2018).

Penggunaan ekstrak pigmen dari aktinomiset dilaporkan oleh Ramesh *et al.*, (2020) menggunakan *Streptomyces* sp. Penelitian tersebut menggunakan ekstrak pigmen sebagai pewarna makanan *agar jelly* dengan jangka waktu penyimpanan selama beberapa bulan pada suhu 4 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *agar jelly* yang diwarnai dengan pigmen dapat bertahan hingga 3 bulan tanpa ada reduksi warna.

Potensi yang dimiliki oleh pigmen aktinomiset sebagai pewarna dalam industri tekstil beberapa sudah dilaporkan. Nuanjohn *et al.*, (2023) melaporkan *Streptomyces gramineus* TBRC 15927 sebagai strain pertama yang bisa menghasilkan aktinomisin dan memiliki potensi dipakai untuk mewarnai kain sutra sekaligus memberi efek antibakteri pada kain tersebut. Pigmen violet yang diproduksi oleh *Streptomyces* DP6 memiliki potensi untuk menjadi pewarna pakaian pada

jenis bahan kain wol dan sutra. Ekstrak pigmen yang diujikan secara langsung dengan mengaplikasikan pada kain wol dan sutra menunjukkan hasil terbaik pada kain wol dibandingkan kain sutra. Perbedaan hasil warna yang diperoleh disebabkan karena sifat amfoter yang dimiliki kain wol (Sharma *et al.*, 2025).

Pigmen Aktinomiset dalam Bidang Kesehatan

Tren penelitian terkait pigmen aktinomiset telah berkembang dalam beberapa tahun terakhir. Potensi yang dimilikinya dalam berbagai aplikasi telah diteliti untuk dikembangkan dalam bidang kesehatan. Aktinomiset diketahui sebagai salah satu produsen utama senyawa bioaktif yang banyak digunakan sebagai antimikrob, antioksidan, terapi antikanker, dan aplikasi dibidang kesehatan lainnya (Cheema *et al.*, 2021).

Pigmen seperti astaxanthin, karotenoid, melanin, indigoidin, flavin, dan kuinon terbukti memiliki efektivitas serta potensi aplikasi klinis dalam pengobatan berbagai penyakit. Pigmen tersebut juga dilaporkan memiliki sifat sebagai senyawa antibiotik, antikanker, dan immunosupresif. Beberapa laporan terkait potensi dari pigmen aktinomiset dalam bidang kesehatan telah dilaporkan (Tabel 2).

Antibiotik merupakan produk penting yang dihasilkan oleh *Streptomyces*. Hampir dari setengah spesies *Streptomyces* yang berhasil diisolasi telah diidentifikasi sebagai penghasil antibiotik. Genus *Streptomyces* merupakan produsen dari antibiotik seperti streptomisin dan deksametason yang banyak digunakan dalam bidang kesehatan (Waters and Tadi 2021).

Pigmen aktinomiset juga telah banyak dilaporkan memiliki aktivitas antioksidan. Penelitian Aqlinia *et al.*,

(2025) menggunakan melanin yang diekstrak dari *Micromonospora fulva* HV6 dan *Streptomyces tendae* NTB15 menunjukkan aktivitas antioksidan saat diujikan menggunakan 2,2-difenil-1-pikrilhidrazil (DPPH) dan 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzo thiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS). Selain itu, isolat *Streptomyces lasalocidi* NTB 42 yang mampu menghasilkan pigmen eumelanin juga dilaporkan memiliki aktivitas antioksidan dan fotoprotektan terhadap UV-C dan UV-B secara *in vivo* menggunakan organisme model *Schizosaccharomyces pombe* ARC039 (Asril *et al.*, 2025).

Pigmen Aktinomiset dalam Industri Kosmetik

Pigmen dari mikroba dapat digunakan dalam industri kosmetik. Pigmen yang paling penting dalam industri kosmetik seperti melanin, berperan besar dalam melindungi kulit dari radiasi UV. Melanin diproduksi oleh berbagai mikroorganisme seperti *Aspergillus fumigatus*, *Vibrio cholerae*, *Cryptococcus neoformans*, *Colletotrichum lagenarium*, *Alteromonas nigrifaciens*, serta sebagian besar spesies *Streptomyces* (Rao *et al.*, 2017; El-Naggar and El-Ewasy 2017).

Penelitian Asril *et al.* (2025) melaporkan efek fotoprotektif dari melanin yang dihasilkan oleh *Streptomyces* sp. NTB 42 terbukti sangat efektif, sehingga berpotensi besar untuk diaplikasikan dalam industri kosmetik, khususnya sebagai bahan utama dalam formulasi tabir surya. Salah satu jenis melanin yaitu eumelanin merupakan molekul polimer yang terbentuk melalui proses polimerisasi senyawa fenolik, sehingga memiliki struktur cincin aromatik khas yang membuatnya efektif dalam melindungi dari radiasi sinar UVB dan UVA, menetralkan radikal bebas, serta mengikat ion logam (Le *et al.*,

2024). Selain itu, melanin memiliki kompatibilitas tinggi dengan bahan biologis dan tingkat toksisitas yang rendah (Kraseasintra *et al.*, 2023),

sehingga memiliki potensi besar untuk dikembangkan dalam bidang farmasi dan kosmetik (Tran-Ly *et al.*, 2020).

Tabel 2. Pigmen aktinomiset yang berpotensi dalam bidang kesehatan

No	Spesies	Pigmen	Aktivitas Biologis	Referensi
1	<i>Streptomyces</i> sp. BSE6.1	Prodigiosin	Antibakteri	Ramesh <i>et al.</i> 2020
2	<i>Micromonospora chalcea</i> HV11.P3 <i>Micromonospora tulbaghiaie</i> SCA54.P2	Hijau-kehitaman Orange	Antioksidan Antibakteri Toksistas	Mesrian <i>et al.</i> 2021
3	<i>Streptomyces yangpuensis</i> ARK19 <i>Streptomyces polychromogenes</i> ARK86	Prodigiosin Karotenoid	Antioksidan Antibakteri Antikanker	Purwaningtyas 2022
4	<i>Streptomyces</i> sp.	Pigmen coklat	Antimikroba	Kazi <i>et al.</i> 2022
5	<i>Streptomyces tunisiensis</i> W4MT573222	Pigmen hijau	Antibakteri Antijamur	Ibrahim <i>et al.</i> 2023
6	<i>Gordonia terrae</i> JSN1.9	Karotenoid	Antibakteri Antijamur	Sholekha <i>et al.</i> 2024
7	<i>Streptomyces lasalocidi</i> NTB 42	Eumelanin	Antioksidan	Asril <i>et al.</i> , 2025
8	<i>Micromonospora</i> sp.	Melanin	Antioksidan	Aqlinia <i>et al.</i> 2025
9	<i>Arthrobacter</i> sp.	kuning-orange	Antioksidan Antibakteri	Girma <i>et al.</i> 2025
10	<i>S. coelicolor</i> M510	Aktinorhodin	Antibakteri	Mak and Nodwell, 2017

KESIMPULAN

Aktinomiset merupakan sumber pigmen alami yang penting karena mampu menghasilkan beragam senyawa berwarna seperti melanin, prodigiosin, dan karotenoid yang memiliki fungsi sebagai pewarna sekaligus menunjukkan aktivitas biologis yang bermanfaat bagi berbagai sektor industri. Pigmen ini telah terbukti memiliki potensi aplikasi dalam bidang pangan, tekstil, kosmetik, kesehatan, dan berbagai bidang lain yang membutuhkan bahan pewarna yang aman serta memiliki nilai fungsional tambahan. Meskipun demikian, pemanfaatannya dalam skala besar masih menghadapi beberapa kendala seperti rendahnya rendemen, variasi kualitas produksi, kebutuhan pemurnian lanjutan, serta biaya proses yang relatif tinggi. Berbagai pendekatan seperti optimasi media kultur, perbaikan kondisi fermentasi, penggunaan bahan baku murah, dan pengembangan *strain* unggul terus dilakukan untuk meningkatkan efisiensi produksi pigmen. Dengan perkembangan

teknologi biologi molekuler dan pemahaman yang semakin mendalam mengenai jalur metabolik aktinomiset, prospek pengembangan pigmen alami dari kelompok mikroorganisme ini diperkirakan akan semakin luas dan relevan sebagai alternatif yang lebih aman dan lebih ramah lingkungan dibandingkan pigmen sintetis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abraham, & Chauhan, R. (2018). Profiling of red pigment produced by *Streptomyces* sp. JAR6 and its Bioactivity. *3 Biotech*, 8:22.
- Aqlinia, M., Astuti, R. I., Prastya, M. E., & Wahyudi, A. T. (2025). Antioxidant potential of melanin pigment from marine sponge-associated actinomycete *Micromonospora* sp. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 15(4), 212-224.
- Asril, M., Astuti, R. I., Rusmana, I., & Wahyudi, A. T. (2025). Photoprotection and antioxidant activity of eumelanin from *Streptomyces*

- lasalocidi* NTB 42 and its photoprotective effects on *Schizosaccharomyces pombe* ARC039. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 262, 113085.
- Celedón, R. S., & Díaz, L. B. (2021). Natural pigments of bacterial origin and their possible biomedical applications. *Microorganisms*, 9(4), 739.
- Cheema, M. T., Ponomareva, L. V., Liu, T., Voss, S. R., Thorson, J. S., Shaaban, K. A., & Sajid, I. (2021). Taxonomic and metabolomics profiling of actinobacteria strains from Himalayan collection sites in Pakistan. *Current Microbiology*, 78(8), 3044-3057.
- Díez, B. H., Torres, C. A., & Gaudêncio, S. P. (2025). Actinomycete-derived pigments: A path toward sustainable industrial colorants. *Marine Drugs*, 23(1), 39.
- El-Naggar, N. E. A., & El-Ewasy, S. M. (2017). Bioproduction, characterization, anticancer and antioxidant activities of extracellular melanin pigment produced by newly isolated microbial cell factories *Streptomyces glaucescens* NEAE-H. *Scientific reports*, 7(1), 1-19.
- El-Zawawy, N. A., Kenawy, E., Ahmed, S., & El-Sapagh, S. (2024). Bioproduction and optimization of newly characterized melanin pigment from *Streptomyces djakartensis* NSS-3 with its anticancer, antimicrobial, and radioprotective properties. *Microbial Cell Factories*, 23(23).
- Ellison, S. L. (2016). Carotenoids: Physiology. *Encyclopedia of Food and Health*, edited by Caballero B, Finglas P M, Toldra F. Elsevier, Amsterdam.
- Fernandes, C. J., Doddavarapu, B., Harry, A., Dilip, S. P. S., & Ravi, L. (2021). Isolation and identification of pigment producing actinomycete *Saccharomonospora azurea* SJCJABS01. *Biomedical and Pharmacology Journal*, 14(4), 2261-2269.
- Girma, D., Feyisa, A., Chaluma, E., Mulu, D., Geta, S., & Tafesse, M. (2025). Insights into the antibacterial, antioxidant, and fabric colorant applications by pigment-producing actinomycetes from Sof-Umer cave rocks and sediments. *BMC Microbiology*, 25(1), 236.
- Ibrahim, W. M., Olama, Z. A., Abou-Elela, G. M., Ramadan, H. S., Hegazy, G. E., & El Badan, D. E. S. (2023). Exploring the antimicrobial, antiviral, antioxidant, and antitumor potentials of marine *Streptomyces tunisiensis* W4MT573222 pigment isolated from Abu-Qir sediments, Egypt. *Microbial Cell Factories*, 22(1), 94.
- Kamarudheen, N., Naushad, T., & Rao, K.V.B. (2019). Biosynthesis, characterization and antagonistic applications of extracellular melanin pigment from marine *Nocardiopsis* sp. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*, 53(2).
- Kazi, Z., Hungund, B. S., Yaradoddi, J. S., Banapurmath, N. R., Yusuf, A. A., Kishore, K. L., Soudagar, M. E. M., Khan, T. M. Y., Elfasakhany, A., & Buyondo, K. A. (2022). Production, characterization, and antimicrobial activity of pigment from *Streptomyces* species. *Journal of Nanomaterials*, 2022(1), 3962301.
- Kraseasintra, O., Sensupa, S., Mahanil, K., Yoosathaporn, S., Pekkoh, J., Srinuanpan, S., Pathom-aree, W., & Pumas, C. (2023). Optimization of melanin production by *Streptomyces antibioticus* NRRL B-1701 using *Arthrospira* (Spirulina) platensis residues hydrolysates as

- low-cost L-tyrosine supplement. *BioTech*, 12(1), 24.
- Le, T. N., Tran, N. T., Pham, V. N., Van-Thi, N. D., & Tran, H. T. (2024). Anti-ultraviolet, antibacterial, and biofilm eradication activities against *Cutibacterium acnes* of melanins and melanin derivatives from *Daedaleopsis tricolor* and *Fomes fomentarius*. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1305778.
- Mak, S. and Nodwell, J.R. (2017). Actinorhodin is a redox-active antibiotic with a complex mode of action against Gram-positive cells. *Molecular Microbiology*, 106(4), 597-613.
- Maoka, T. (2019). Carotenoids as natural functional pigments, *Journal of Natural Medicines*, 74 (1), 1-16.
- Mesrian, D. K., Purwaningtyas, W. E., Astuti, R. I., Hasan, A. E. Z., & Wahyudi, A. T. (2021). Methanol pigment extracts derived from two marine actinomycetes exhibit antibacterial and antioxidant activities. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(10).
- Mnif, S., Jardak, M., Bouizgarne, B., & Aifa, S. (2022). Prodigiosin from *Serratia*: synthesis and potential applications. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*; 12(6), 233-242.
- Nuanjohn, T., Suphrom, N., Nakaew, N., Pathom-Aree, W., Pensupa, N., Siangsuepchart, A., Dell, B., & Jumpathong, J. (2023). Actinomycins from soil-inhabiting *Streptomyces* as sources of antibacterial pigments for silk dyeing. *Molecules*, 28(16), 5949.
- Numan, M., Bashir, S., Mumtaz, R., Tayyab, S., Rehman, N. U., Khan, A. L., Shinwari, Z. K., & Al-Harrasi, A. (2018). Therapeutic applications of bacterial pigments: a review of current status and future opportunities. *3 Biotech*, 8(4), 207.
- Parmar, R. S., & Singh, C. (2018). A comprehensive study of eco-friendly natural pigment and its applications. *Biochemistry and Biophysics reports*, 13, 22-26.
- Pattapulavar, V., Ramanujam, S., Sekaran, M., Chandrasekaran, R., Panchal, S., & Christopher, J.G. (2025). Biosynthetic pathway of psi, psi-carotene from *Streptomyces* sp. VITGV38 (MCC 4869). *Frontiers in Microbiology*.
- Purwaningtyas W. E. 2022. The Potencies of *Streptomyces*-derived Biopigment as Antioxidant, Antibacterial and Anticancer Agents. [tesis]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Ramesh, C., Vinithkumar, N.V., Kirubakaran, R., Venil, C.K., & Dufossé, L. (2020). Applications of prodigiosin extracted from marine red pigmented bacteria *Zooshikella* sp. and actinomycete *Streptomyces* sp. *Microorganisms*, 8(556).
- Rao, N. M. P., Xiao, M., & Li, W. J. (2017). Fungal and bacterial pigments: secondary metabolites with wide applications. *Frontiers in microbiology*, 8, 1113.
- Sajjad, W., Ahmad, S., Aziz, I., Azam, S.S., Hasan, F. & Shah, A.A. (2018). Antiproliferative, antioxidant and binding mechanism analysis of prodigiosin from newly isolated radio-resistant *Streptomyces* sp. strain WMA-LM31. *Molecular Biology Reports*, 45(6), 1787-1798.
- Sandmann, G. (2021). Carotenoids: biosynthetic and biofunctional approaches, advances in experimental medicine and biology. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 1261.
- Sarmiento-Tovar, A.A, Silva, L., Sánchez-Suárez, J., & Diaz, L.

- (2022). *Streptomyces*-derived bioactive pigments: ecofriendly source of bioactive compounds. *Coatings*, 12(1858).
- Selim, M.S.M., Abdelhamid, S.A., & Mohamed, S.S. (2021). Secondary metabolites and biodiversity of actinomycetes. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 19(72).
- Shaaban, M.T., El-Sabbagh, S.M.M., & Alam, A. (2013). Studies on an Actinomycete Producing a Melanin Pigment Inhibiting Aflatoxin B1 Production by *Aspergillus flavus*. *Life Science Journal*, 10(1).
- Sharma, D., Kaur, T., Kaur, V., & Manhas, R. K. (2025). A Sustainable Alternative: Violet Pigment from *Streptomyces* DP6 for Textile Applications. *Journal of Advances in Microbiology*, 25(5), 146-159.
- Sheefaa, M.I., & Sivaperumal, P. (2022). Antioxidant activities from melanin pigment produced by marine actinobacterium of *Streptomyces* species. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 13.
- Sholekha, S., Budiarti, S., Hasan, A. E. Z., Krishanti, N. P. R. A., & Wahyudi, A. T. (2024). Antimicrobial potential of an actinomycete *Gordonia terrae* JSN1. 9-derived orange pigment extract. *HAYATI Journal of Biosciences*, 31(1), 161-170.
- Sowani, H., Mohiteb, P., Damalec, S., Kulkarnia, M., & Zinjardeb, S. (2016). Carotenoid stabilized gold and silver nanoparticles derived from the actinomycete *Gordonia amicalis* HS-11 as effective free radical scavengers. *Enzyme and Microbial Technology*, 95, 164-173.
- Stankovic, N., Senerovic, L., Ilic-Tomic, T., Vasiljevic, B., & Nikodinovic-Runic. (2014). Properties and applications of undecylprodigiosin and other bacterial prodigiosins. *Journal of Applied Microbiological Biotechnology*, 98, 3841–3858.
- Tarangini, K., & Mishra, S. (2014). Production of melanin by soil microbial isolate on fruit waste extract: two step optimization of key parameters. *Biotechnology Reports*, 4, 139–146.
- Toledo, A.V., Franco, M.E.E, Lopez, S.M.Y, MariIné, T., Saparrat, M.C.N., Balatti, P.A, (2017). Melanins in fungi: Types, localization and putative biological roles. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 99, 2-6.
- Tran-Ly, A. N., Reyes, C., Schwarze, F. W., & Ribera, J. (2020). Microbial production of melanin and its various applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(11), 170.
- Venil, C. K., Zakaria, Z. A., & Ahmad, W. A. (2013). Bacterial pigments and their applications. *Process Biochemistry*, 48(7), 1065-1079.
- Waters, M., & Tadi, P. (2020). Streptomycin. FL: StatPearls.
- Xu, Z., Li, Y., Wang, Y., Deng, Z. and Tao, M., 2019. Genome-wide mutagenesis links multiple metabolic pathways with actinorhodin production in *Streptomyces coelicolor*. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(7), e03005-18.
- Yuan, H., Zhang, J., Nageswaran, D., & Li, L. (2015). Carotenoid metabolism and regulation in horticultural crops. *Horticulture Research*. 2, 15036,
- Zhou, M., Han, M., & Qing, J., Yu, M. (2024). Characterization, components, and chemical structure of a novel natural pigments derived from *Streptomyces tauricus*. *European*

Food Research and Technology,
250 (11), 2781–2795.