



BETALAINS AS NATURAL DYES AND THEIR APPLICATIONS

Tasya Fauziah dan Okta Suryani*

Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang
Jln. Prof. Dr. Hamka Air Tawar, Padang, 25131, Indonesia.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 08 Jul 2024,

Revised 30 Oct 2024,

Accepted 31 Oct 2024,

Available online 11 Nov 2024,

Keywords:

- ✓ betalains;
- ✓ betacyanins;
- ✓ betaxanthins;
- ✓ natural dye;
- ✓ natural pigment

*corresponding author:

okta.suryani.os@gmail.com

Phone: +62

[https://doi.org/10.31938/jsn.v](https://doi.org/10.31938/jsn.v14i3.737)

[14i3.737](https://doi.org/10.31938/jsn.v14i3.737)

ABSTRACT

Betalains are natural pigments that include betacyanin and betaxanthin, found in plants such as beets and cacti. In the food industry, betalains are used as natural colorants due to their color stability and health benefits, including antioxidant and anti-inflammatory properties that support the prevention of degenerative diseases. With increasing demand for natural ingredients, betalains are also being promoted in the cosmetics and health product industries. In the healthy food sector, new extraction techniques like microwave-assisted extraction and aqueous two-phase technology have improved the purification efficiency and quality of betalain pigments. In cosmetics, betalains are utilized as anti-aging and anti-inflammatory components, with innovative approaches like biopolymer encapsulation to enhance product stability. Geographical trends show significant interest in betalain use in natural cosmetics and healthy foods in Europe and Asia, while research in Latin America focuses on its potential as a supplement and food colorant. In renewable energy technology, betalains act as photosensitizers in dye-sensitized solar cells (DSSCs), though their stability still requires optimization, such as through co-sensitization with other pigments. These innovations suggest that betalains hold considerable potential in the food, cosmetics, and energy industries, making them a versatile and globally relevant natural material.

Betalain sebagai Pewarna Alami dan Aplikasinya

ABSTRAK

Betalain adalah pigmen alami yang mencakup betasianin dan betaxanthin, ditemukan pada tanaman seperti bit dan kaktus. Dalam industri pangan, betalain digunakan sebagai pewarna alami karena stabilitas warna dan manfaat kesehatannya, termasuk sifat antioksidan dan anti-inflamasi yang mendukung pencegahan penyakit degeneratif. Seiring dengan meningkatnya permintaan bahan alami, betalain juga dipromosikan dalam industri kosmetik dan produk kesehatan. Di sektor pangan sehat, teknik ekstraksi baru seperti ekstraksi berbantuan microwave dan teknologi dua fase cair telah meningkatkan efisiensi pemurnian dan kualitas pigmen betalain. Dalam kosmetik, betalain digunakan sebagai komponen anti-penuaan dan anti-inflamasi, dengan pendekatan inovatif seperti enkapsulasi dalam biopolimer untuk meningkatkan stabilitas produk. Tren geografis menunjukkan minat besar pada penggunaan betalain dalam kosmetik alami dan pangan sehat di Eropa dan Asia, sementara di Amerika Latin, penelitian terfokus pada potensinya sebagai bahan suplemen dan pewarna makanan. Dalam teknologi energi terbarukan, betalain berperan sebagai fotosensitizer dalam sel surya berbasis pewarna (DSSC), meskipun stabilitasnya masih memerlukan optimasi, misalnya melalui ko-sensitisasi dengan pigmen lain. Inovasi ini mengindikasikan bahwa betalain memiliki potensi besar dalam industri pangan, kosmetik, dan energi, menjadikannya bahan alami yang serbaguna dan relevan untuk aplikasi global.

Kata Kunci; betalain; betasianin; betaxanthin; zat warna alami; pigmen alami

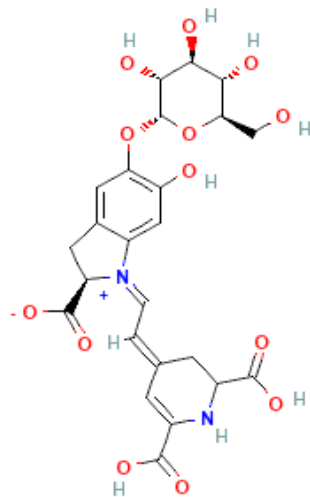
SENYAWA BETALAIN

Betalain adalah pigmen yang membuat buah, bunga, dan jaringan vegetatif berwarna merah-

ungu dan kuning-oranye. Betalain dan antosianin adalah senyawa turunan, tetapi keduanya memiliki struktur kimia yang berbeda. Betalain memiliki ikatan nitrogen, sedangkan antosianin

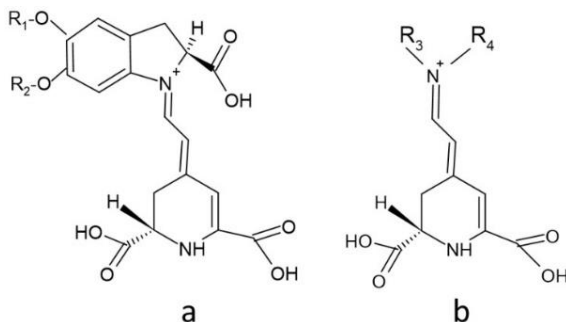


tidak. Akibatnya, keduanya tidak pernah ditemukan bersama dalam satu tanaman (Sari et al., 2018).



Gambar 1. Struktur Betalain

Dua kelas senyawa betalain adalah *betaxanthins* dan *betacyanins*. *Betaxanthin* kuning memiliki spektrum serapan maksimum pada 480 nm, dan *betacyanin* ungu memiliki spektrum serapan maksimum pada 536 nm (Timoneda et al., 2019).



Gambar 2. Struktur *Betacyanin* dan *Betaxanthin* (Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2021)

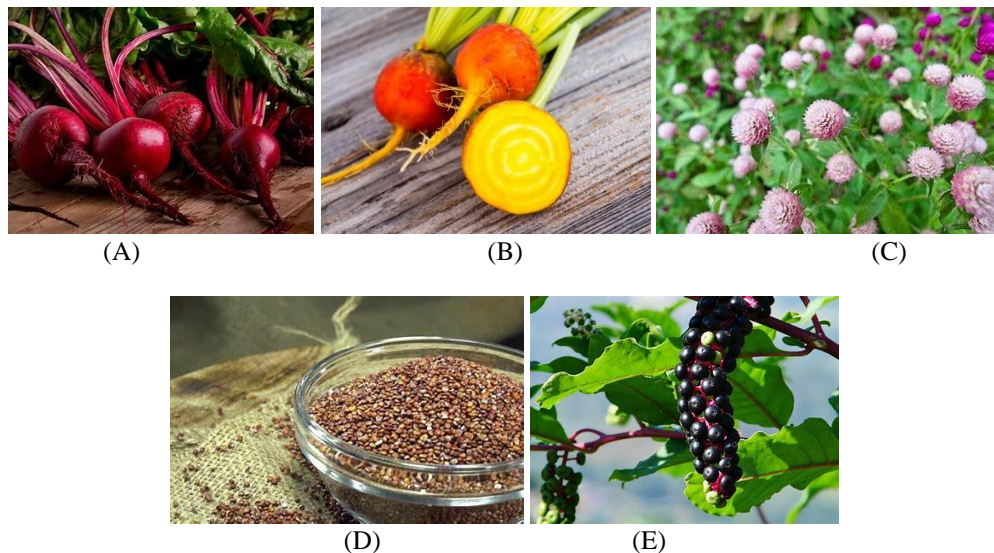
Betalain adalah pigmen alami yang banyak digunakan dalam industri pangan karena warnanya yang menarik dan sifat antioksidannya. Pigmen ini terutama terdapat pada tanaman berwarna merah keunguan seperti bit (Sari, et al., 2016). Selain itu, betalain memiliki potensi kesehatan sebagai antioksidan yang dapat melindungi tubuh dari radikal bebas, yang berkaitan dengan pencegahan berbagai penyakit degeneratif (Shafira et al., 2019).

Seiring dengan meningkatnya minat terhadap betalain, beberapa metode ekstraksi inovatif dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas pigmen ini. Misalnya, metode ekstraksi

berbantuan microwave telah terbukti mampu meningkatkan hasil ekstraksi betalain hingga dua kali lipat dibandingkan metode konvensional, serta mengurangi penggunaan pelarut dan waktu proses (Cardoso-Ugarte et al., 2014; Zin et al., 2020). Selain itu, teknologi ekstraksi dua fase cair yang baru digunakan, memungkinkan pemurnian betalain lebih efisien, serta penghilangan gula berlebih yang dapat mempercepat degradasi pigmen (Chethana et al., 2007). Inovasi ini juga memungkinkan penerapan betalain dalam bidang kosmetik dan suplemen pangan, selain industri makanan (Zannou et al., 2024).

Lebih lanjut, sifat anti-radikal betalain dapat memberi manfaat khusus untuk pencegahan penyakit yang terkait dengan stres oksidatif, seperti penyakit kardiovaskular. Studi juga menunjukkan bahwa dibandingkan dengan pigmen alami lain, betalain cenderung memiliki stabilitas lebih rendah terhadap suhu dan pH ekstrem, sehingga membutuhkan teknik mikroenkapsulasi untuk mempertahankan kestabilannya (Nirmal et al., 2021). Sejalan dengan perkembangan keberlanjutan, beberapa penelitian juga mengeksplorasi penggunaan limbah tanaman sebagai sumber betalain, yang mendukung pengembangan produk pangan yang lebih ramah lingkungan (Merreddy et al., 2017).

Ada beberapa sumber *betacyanin* yang dapat dimakan seperti bit merah dan kuning (*B. vulgaris* sp. *vulgaris*) (Chhikara et al., 2019), *B. buah alba* (Kumar et al., 2015), *Bunga G. globose*, bayam kasar (*Amaranthus* sp.), biji-bijian *Chenopodium quinoa* (Jarvis et al., 2017), daun *A. hortensis* var. *rubra*, dan buah-buahan/bunga dari genus kaktus (*Opuntia*, *Hylocereus*, *Mammillaria*, *Melocactus*, dan *Myrtillocactus spec.*). Pokeberry (*Phytolacca americana* L.) adalah sumber lain dari *betacyanin*, tetapi telah dilarang sebagai pewarna makanan karena adanya saponin beracun dan lektin (Gengatharan et al., 2015). Usaha terbaru untuk membuat ekstrak *betacyanin* dari pokeberry lebih aman mencakup metode pemurnian dengan menggunakan pelarut butanol, aseton, dan etil eter untuk mengekstraksi saponin dari ekstrak buah pokeberry. Metode ini terbukti efektif mengurangi saponin hingga 97%, sehingga meningkatkan potensi penggunaannya sebagai pewarna makanan (Driver & Francis, 1979). Selain itu, pengembangan teknik kromatografi *counter-current ion-pair* untuk pemisahan *betacyanin* dari ekstrak berry pokeberry memungkinkan pengambilan pigmen yang lebih murni dan stabil, mengurangi risiko toksisitas (Jerz et al., 2008).



Gambar 3. Beberapa Tanaman yang mengandung senyawa betalain. (A) Bit merah, (B) Bit kuning, (C) Buah alba, (D) Bunga *G. globose*, (E) Pokeberry.

BETALAIN SEBAGAI ZAT WARNA ALAMI

Betalain Sebagai Pewarna Makanan

Pewarna makanan adalah bahan tambahan yang digunakan untuk mewarnai makanan dan membuatnya lebih menarik. Dua jenis pewarna makanan adalah pewarna sintetis dan alami. Pewarna sintetis lebih umum digunakan karena menawarkan keuntungan yang lebih besar bagi produsen. Namun, pewarna alami, baik dalam bentuk cair maupun serbuk, dapat digunakan sebagai pengganti pewarna sintetis (Mayangsari et al., 2015).

Ekstrak tumbuhan alami yang mengandung pigmen betalain semakin banyak digunakan dalam teknologi makanan sebagai alternatif yang aman untuk pewarna makanan sintetis (Rahimi, Abedimanesh, et al., 2019). Sediaan makanan yang diperoleh dalam kondisi industri yang berbeda, sangat bervariasi dalam hal stabilitas dan pewarnaan karena keberadaan dan komposisi produk degradasi betasianin. Betalain stabil pada pH mulai dari 3 hingga 7 dan cocok untuk mewarnai makanan asam dan netral.

Menurut penelitian Ali dan Jameel (2023), menambahkan betalain ke dalam es krim memiliki berdampak besar pada bahan kimia es krim dan mikrobiologis, termasuk keasaman yang dapat dititrasi, protein, pH, lemak, jumlah keseluruhan mikroorganisme, dan karakteristik sensorik. Hasilnya menunjukkan bahwa konsentrasi betalain 50, 100, dan 200 mg/mL mempertahankan konsistensi sampel es krim dalam menghambat oksidasi lipid dan hidrolisis

protein, diantara indikator kualitas lainnya. Tingkat keasamannya yang tinggi dan faktor kualitas lainnya, kimia, mikrobiologi, dan penilaian sensorik es krim menggunakan pewarna merah 40 (pigmen sintetis) menemukan bahwa es krim tersebut tidak dapat disimpan untuk lebih dari 40 hari. Betalain sebagai pengawet makanan alami dapat ditambahkan ke produk untuk meningkatkan stabilitas selama penyimpanan (Ali & Jameel, 2023). Pasch et al. (1975) meneliti stabilitas betalain dalam produk susu seperti yogurt dan es krim, menunjukkan bahwa betalain dapat mempertahankan warna dan kualitas sensori lebih lama dibanding pigmen sintetis, jika dikemas dengan teknik pengolahan yang tepat (Pasch et al., 1975). Penggunaan teknologi inkapsulasi modern dapat mengatasi tantangan stabilitas betalain dalam industri makanan. Zannou et al. (2024) melaporkan bahwa teknik inkapsulasi dengan biopolimer dan nanopartikel dapat menjaga pigmen betalain lebih tahan terhadap perubahan lingkungan, selama penyimpanan dan pemrosesan (Zannou et al, 2024)

Setiawan et al. (2016) meneliti potensi kulit umbi bit (*Beta vulgaris*) sebagai sumber betalain alami dan melaporkan bahwa kadar air tinggi dalam kulit umbi bit mempermudah ekstraksi, meskipun konsentrasi senyawa fenolik cenderung lebih rendah karena keterbatasan kelarutan dalam air. Penelitian lebih lanjut mengenai betalain dari kulit buah naga merah (*Hylocereus polyrhizus*) oleh Mehita et al. (2021) menunjukkan bahwa faktor pH, kadar air, dan intensitas warna sangat dipengaruhi oleh suhu dan waktu ekstraksi.

Ekstraksi pada suhu lebih rendah (di bawah 50°C) dan waktu yang lebih lama, meningkatkan intensitas warna karena kestabilan betalain yang menurun pada suhu tinggi (Mehita et al., 2021). Seiring dengan kemajuan dalam ekstraksi betalain, teknik baru seperti ekstraksi berbantuan gelombang mikro dan ultrasonik telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi. Cardoso-Ugarte et al. (2014) melaporkan bahwa ekstraksi berbantuan gelombang mikro (MAE) dari umbi bit dapat menghasilkan rendemen betalain hingga dua kali lipat dibandingkan metode konvensional (Cardoso-Ugarte et al., 2014). Selain itu, penggunaan medan listrik pulsa (PEF) dalam ekstraksi betalain dari bit merah segar dapat mencapai hingga 70% efisiensi, menjadikannya metode yang hemat energi dan ramah lingkungan (Visockis et al., 2021). Teknik modern lainnya, seperti ekstraksi dua fase berair, juga telah diusulkan untuk memurnikan dan mengkonsentrasikan betalain sambil meminimalkan pengaruh senyawa pengganggu, seperti gula bebas (Chethana et al., 2007). Kemajuan ini mendukung penelitian betalain sebagai pewarna alami yang stabil dan aman digunakan dalam industri makanan dengan aplikasi yang semakin luas dalam makanan fungsional dan minuman (Zannou, et al., 2024). Stabilitas pewarna alami serbuk bit merah dalam adonan tepung mocaf selama pengukusan mendapatkan hasil bahwa semakin banyak konsentrasi bit merah yang ditambahkan pada adonan tepung mocaf meningkatkan intensitas warna merah, aktivitas antioksidan, kandungan betalain, dan kadar amilopektin. Sementara itu, semakin lama pengukusan adonan, semakin rendah intensitas kecerahan, intensitas warna merah, aktivitas antioksidan, dan kandungan betalain, dan kadar amilopektin (Mayangsari et al., 2015).

Betalain Sebagai Kosmetik Kecantikan

Betalain, selain digunakan sebagai pewarna makanan, juga dikenal dalam industri kosmetik berkat sifat antioksidan dan anti-inflamasinya yang tinggi. Betalain membantu melindungi kulit dari kerusakan oksidatif yang disebabkan oleh radikal bebas, yang dapat meminimalisir tanda-tanda penuaan pada kulit (Moreno-Ley et al., 2021). Senyawa ini juga menunjukkan potensi sebagai agen anti-inflamasi yang kuat dengan menghambat ekspresi sitokin pro-inflamasi seperti TNF- α dan IL-1 β , serta enzim seperti COX-2, yang dapat membantu menenangkan kulit yang teriritasi dan meradang (Smeriglio et al.,

2021). Selain itu, betalain memiliki kemampuan pewarnaan yang kuat, larut dalam air, dan dapat berinteraksi secara sinergis dengan komponen lain dalam formulasi kosmetik, seperti polifenol dan antioksidan lainnya, yang secara keseluruhan meningkatkan stabilitas dan efektivitas produk kosmetik (Georgiev et al., 2010).

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa kombinasi betalain dengan bahan aktif lainnya, seperti vitamin C, memiliki efek sinergis yang memperkuat aktivitas antioksidan, melindungi kulit dari stres oksidatif, dan memperpanjang usia simpan produk (Butera et al., 2002). Sebagai bahan kosmetik, betalain tidak hanya aman digunakan tetapi juga memiliki bioavailabilitas tinggi, sehingga dapat diserap dengan baik oleh kulit (Khan, 2016). Semua sifat ini mendukung betalain sebagai bahan yang potensial dalam produk perawatan kulit anti-penuaan dan anti-inflamasi modern.

Hasuti (2016) melakukan penelitian mengenai aktivitas antioksidan dari formulasi lipstik yang menggabungkan ekstrak buah naga merah dan umbi bit, dilaporkan memenuhi persyaratan tes fisik dan menunjukkan aktivitas antioksidan yang kuat. Penggunaan ekstrak alami dari buah naga merah dan bit dalam formulasi lipstik, menawarkan alternatif yang lebih aman untuk pewarna sintetis, berpotensi mengurangi risiko efek berbahaya yang terkait dengan bahan sintetis dalam kosmetik (Hasuti et al., 2016). Fitri, et al. (2020) melakukan penelitian mengenai pembuatan dan uji sediaan lip *balm* yang dibuat dari sari umbi bit (*Beta vulgaris* L.) sebagai pewarna alami., melaporkan bahwa lip *balm* menggunakan pewarna alami dari ekstrak bit, khususnya betalain dan *betaxanthin*, menunjukkan konsistensi, warna, dan rasa yang baik serta non-iritasi, titik leleh, tingkat pH, dan homogenitas kulit. Ekstrak bit menunjukkan aktivitas antioksidan yang kuat, menjadikannya bahan alami yang menjanjikan untuk produk perawatan bibir. Hal ini menunjukkan bahwa ekstrak bit dapat diformulasikan secara efektif menjadi lip *balm* untuk manfaat antioksidan (Fitri et al., 2020).

Fazadini dan Ernawati (2024) meneliti formulasi krim bibir dengan ekstrak bit sebagai pewarna alami, dan menemukan bahwa ekstrak bit mampu memberikan karakteristik yang diinginkan seperti stabilitas warna, aroma yang menyenangkan, dan pH yang sesuai. Penggunaan bahan alami ini menunjukkan keunggulan dibandingkan pewarna sintetis, terutama dalam menurunkan potensi iritasi dan meningkatkan

kualitas produk kosmetik (Fazadini & Ernawati, 2024). Namun, untuk menjaga stabilitas warna ekstrak bit dalam kondisi bervariasi, pendekatan seperti enkapsulasi dapat digunakan. Enkapsulasi ekstrak bit dalam inulin atau maltodekstrin telah terbukti meningkatkan stabilitas warna terhadap pengaruh panas, oksigen, dan cahaya (Omae et al., 2017; Janiszewska, 2014). Dalam kondisi pH rendah dan suhu tinggi, stabilitas termal ekstrak bit juga dapat ditingkatkan melalui penggunaan polisakarida anionik, seperti gum arab dan alginat, yang mempertahankan stabilitas pigmen merah secara signifikan selama penyimpanan (Selig et al., 2018). Pendekatan ini menambah nilai dalam formulasi kosmetik dengan menjaga kualitas warna produk dalam berbagai kondisi. Farika, et al. (2024) melakukan penelitian mengenai aktivitas antioksidan *liptint* kombinasi buah bit dan ekstrak kulit buah manggis sebagai antioksidan alami pelindung bibir, melaporkan bahwa kombinasi ekstrak buah bit dan kulit buah manggis memiliki potensi sebagai *liptint* dengan aktivitas antioksidan sangat tinggi yang efektif dalam melindungi bibir dari kerusakan akibat radikal bebas (Farika et al., 2024).

Pemanfaatan pigmen betalain dari ekstrak bit untuk kosmetik, khususnya produk seperti *liptint* dan *blush on*, menunjukkan hasil yang menjanjikan dari segi stabilitas, keamanan, dan penerimaan sensorik. Dalam penelitian oleh Aulia dan Widowati (2018), *liptint* berbahan ekstrak buah bit dinyatakan layak dan disukai oleh panelis melalui uji sensorik dan preferensi, memberikan alternatif alami yang menarik sebagai pengganti pewarna sintetis (Aulia & Widowati, 2018). Oktaviani dan Krisnawati (2019) juga menemukan bahwa *blush on shimmer* dengan pewarna alami dari ekstrak bit memiliki tingkat validitas dan penerimaan tinggi, menunjukkan bahwa produk kosmetik dengan pewarna alami dapat diterima baik oleh pengguna (Oktaviani & Krisnawati, 2019).

Penelitian terbaru menekankan pada beberapa keuntungan betalain dalam stabilitas dan keamanan. Sadowska-Bartosz dan Bartosz (2021) menemukan bahwa betalain memiliki aktivitas antioksidan yang kuat, serta stabilitas yang baik dalam bentuk terenkapsulasi, memungkinkan betalain bertahan dalam kondisi penyimpanan yang lebih lama dan melindungi dari degradasi warna (Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2021). Selain itu, penelitian oleh Martins et al. (2017) menyatakan bahwa betalain stabil pada kondisi penyimpanan tertentu, menjadikannya sebagai

alternatif pewarna alami yang aman dan menarik dalam kosmetik, makanan, dan farmasi.

Dalam aplikasi kosmetik lainnya, penggunaan ekstrak umbi bit dalam pewarna rambut berbentuk gel, menunjukkan bahwa betalain tidak hanya aman bagi kulit, tetapi juga memiliki stabilitas warna yang baik, serta tekstur yang disukai panelis (Zaky et al., 2023). Rahimi et al. (2018) juga mengonfirmasi bahwa betalain aman digunakan karena tidak menyebabkan iritasi dan memiliki potensi sebagai pewarna alami, karena sifat antioksidan dan anti-inflamasi yang dimilikinya.

Betalain Sebagai Suplemen Alami

Dalam beberapa tahun terakhir, betalain semakin diakui sebagai suplemen makanan alami dengan manfaat kesehatan. Studi tentang suplemen yang mengandung ekstrak kaya betalain, seperti suplemen bit merah dan *Opuntia stricta* yang kaya *betacyanin*, menunjukkan bahwa suplemen ini mampu menurunkan kadar glukosa, kolesterol total, homosistein, trigliserida, dan LDL di antara 48 pasien laki-laki dengan penyakit arteri koroner. Selain itu, suplementasi betalain dengan dosis aman 50 mg per hari selama dua minggu, mengurangi tekanan darah sistolik dan diastolik (Rahimi, et al., 2019).

Penelitian terbaru menggunakan teknologi proteomik dan metabolomik memberikan wawasan lebih mendalam mengenai mekanisme molekuler dari efek antioksidan betalain, yang diketahui dapat mengaktifkan jalur transkripsi Nrf2 untuk perlindungan seluler terhadap stres oksidatif dan inflamasi, serta mempromosikan kesehatan kardiovaskular. Selain itu, betalain telah terbukti mencegah oksidasi LDL, sebuah proses yang berkontribusi pada aterosklerosis, melalui afinitas tinggi terhadap lipoprotein ini yang memberikan perlindungan antioksidan tambahan (Tesoriere et al., 2003).

Di sisi lain, quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) juga telah dikembangkan menjadi berbagai produk nutraceutical yang menunjang kesehatan kardiovaskular, pencernaan, dan metabolisme. Studi proteomik pada quinoa telah mengidentifikasi adanya pigmen betalain, terbukti berperan dalam proteksi sel terhadap stres oksidatif dan memiliki manfaat anti-inflamasi (Henarejos-Escudero et al., 2022).

Betalain Sebagai Anti Kanker

Betalain, terutama betanin, menunjukkan potensi antikanker melalui berbagai mekanisme termasuk penghambatan proliferasi sel kanker,

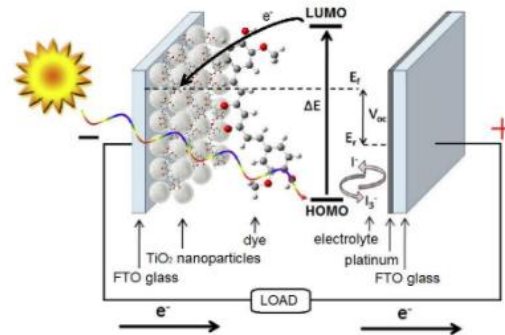
induksi apoptosis, dan penghambatan jalur sinyal penting seperti PI3K/Akt/mTOR, yang relevan dalam pertumbuhan kanker. Efek antikanker ini telah ditunjukkan dalam penelitian *in vitro* pada sel kanker hati HepG2, dengan konsentrasi betalain sebesar 200 µg/mL yang berhasil menghambat proliferasi sel hingga 49% (Lee et al., 2014). Ekstrak bit merah yang kaya betalain juga diketahui menginduksi apoptosis pada sel kanker payudara MCF-7 melalui peningkatan ekspresi protein terkait apoptosis dan modifikasi potensial membran mitokondria, mengindikasikan keterlibatan jalur apoptosis intrinsik dan ekstrinsik (Nowacki et al., 2015). Selain itu, betalain juga menurunkan viabilitas sel kanker paru-paru non-sel kecil, tanpa menimbulkan toksisitas pada sel normal (Yin et al., 2021).

Namun, potensi klinis betalain dalam terapi kanker masih perlu dikaji lebih lanjut melalui uji klinis untuk memahami efikasinya, efek samping yang mungkin timbul, serta potensi interaksi dengan obat kemoterapi konvensional. Beberapa penelitian pada fase klinis awal telah menunjukkan bahwa terapi kombinasi agen antikanker alami dan konvensional dapat meningkatkan efikasi sekaligus menurunkan toksisitas pada sel normal (Seca & Pinto, 2018). Namun, penerapan betalain dalam rejimen klinis membutuhkan penelitian lebih lanjut untuk memastikan keamanannya, terutama dalam dosis yang diperlukan untuk efek antikanker yang optimal (Tsimberidou, 2015).

Betalain Sebagai DSSC

Pewarna berbasis nabati, seperti betalain yang diekstrak dari buah bit dan bunga bougainvillea, telah digunakan sebagai *sensitizer* dalam sel surya yang peka terhadap pewarna (*Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) dan menunjukkan potensi dalam efisiensi konversi energi matahari. Namun, salah satu tantangan utama dalam penggunaan betalain adalah degradasi warna yang dipercepat oleh paparan sinar UV dan ketidakstabilan termal, yang dapat menurunkan kinerja DSSC secara signifikan dalam jangka waktu panjang (Prabavathy et al., 2017). Selain itu, penelitian telah menemukan bahwa efisiensi injeksi elektron dari betalain ke elektroda oksida, seperti titanium dioksida, masih terbatas akibat konversi internal yang cepat pada tingkat S1 ke S0, yang membatasi efisiensi total DSSC (Wendel et al., 2017). Dalam upaya meningkatkan stabilitas dan efisiensi DSSC berbasis betalain, pendekatan terbaru melibatkan penggabungan

betalain dengan pewarna lain seperti antosianin untuk memperluas spektrum penyerapan cahaya dan meningkatkan stabilitas pewarna terhadap degradasi fotokimia (Obi et al., 2020). Selain itu, teknologi baru seperti pemanfaatan bahan tambahan seperti nanotube karbon dan perlakuan TiCl₄, terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas dan efisiensi DSSC berbasis pewarna alami (Kabir et al., 2019).



Gambar 4. Skema dan Prinsip Kerja DSSC (Ilic & Paunovic, 2019)

Srivastava et al. (2022) melakukan penelitian mengenai pengaruh fotoanoda Ti_{1-x}Fe_xO₂ pada kinerja DSSC menggunakan pigmen betalain alami yang diekstraksi dari *Beta vulgaris* (BV). Studi ini menyoroti bahwa sintesis nanorod TiO₂ (NR) yang didoping Fe mampu meningkatkan kinerja, serta stabilitas DSSC, seiring dengan peningkatan kemampuan penyerapan cahaya yang signifikan akibat doping Fe. Inovasi ini mendukung efisiensi pemanenan cahaya lebih tinggi dan mengurangi rekombinasi muatan, sehingga meningkatkan sifat transpor elektron dalam DSSC. Selain itu, kemajuan stabilisasi betalain juga menjadi aspek kunci untuk menjaga kinerja DSSC, seperti metode lapisan TiO₂ melalui *atomic layer deposition* (ALD) yang mampu mencegah desorpsi pigmen pada kondisi ekstrim dan meningkatkan sifat hidrofobik dari fotoelektroda (Son et al., 2013). Ko-sensitisasi dengan pigmen lain seperti klorofil, terbukti memperluas spektrum serapan cahaya dan meningkatkan efisiensi konversi DSSC secara keseluruhan (Patni et al., 2020). Studi ini menunjukkan potensi integrasi doping Fe dan betalain alami, serta pengembangan teknik stabilisasi untuk memajukan teknologi DSSC berbasis bahan alami yang lebih efisien dan stabil.

Isah, et al. (2015) melakukan penelitian tentang pigmen betalain sebagai fotosensitizer alami untuk DSSC: pengaruh pH pewarna pada parameter fotolistrik, melaporkan DSSC dengan

pH sensitizer pewarna 1,23 menunjukkan kinerja yang paling buruk, karena degradasi betalain dalam kondisi sangat asam dan pencucian pewarna dari permukaan TiO₂, menghasilkan berkurangnya kerapatan arus foto, dan faktor pengisian. Sebaliknya, DSSC menggunakan pH sensitizer pewarna 3,0 menunjukkan hasil yang unggul, menunjukkan kepadatan arus foto tertinggi. Namun, pada pH 5,7 penyerapan betanin yang buruk ke permukaan titania menyebabkan penurunan parameter fotolistrik, menunjukkan bahwa tingkat pH yang terlalu tinggi, dapat berdampak negatif pada kinerja DSSC. Meskipun tidak mencapai tingkat efisiensi pewarna hitam, ekstrak betalain dari bunga *Bugenvilea glabra* menjadi alternatif karena murah, tidak beracun, dan ramah lingkungan untuk DSSC, berpotensi sebagai fotosensitizer berkelanjutan.

Cahyani dan Sanjaya (2021) melakukan penelitian tentang potensi senyawa betalain pada ekstrak biji binahong (*Anredera cordifolia*) sebagai fotosensitizer DSSC, melaporkan analisis spektrum serapan mengungkapkan bahwa senyawa betalain dalam ekstrak memiliki puncak penyerapan yang kuat pada panjang gelombang 537 nm, dikaitkan dengan kombinasi *betaxanthins* dan *betacyanins* yang ada dalam ekstrak. Penelitian ini juga mengidentifikasi berbagai gugus fungsi dalam ekstrak, seperti C-H alifatik, peregangan asimetris C-O, cincin benzena C-H, dan getaran CO asam karboksilat, memberikan wawasan tentang komposisi kimia ekstrak biji binahong bertangkai merah (Cahyani & Sanjaya, 2021).

Lestari dan Setiarso (2021) melakukan penelitian tentang studi elektrokimia yang menggunakan ekstrak betalain umbi bit sebagai pewarna alami untuk sel surya sensitif warna (DSSC) menunjukkan bahwa bit segar dapat digunakan dengan sukses sebagai sumber pewarna alami untuk DSSC. Penelitian ini menunjukkan bahwa bit segar dapat digunakan sebagai bahan baku yang hemat biaya dan ramah lingkungan untuk aplikasi sel surya. Pewarna alami yang diekstraksi dari umbi betalain menunjukkan puncak penyerapan pada 534 nm, menunjukkan adanya pigmen betasianin. Karakterisasi elektrokimia mengungkapkan tingkat energi HOMO dan LUMO dalam pewarna, dengan energi HOMO pada -5,00 eV dan energi LUMO pada -3,71 eV. *Bandgap* energi pewarna dihitung menjadi 1,29 eV, menunjukkan kesesuaiannya sebagai sensitizer dalam aplikasi DSSC. Analisis karakteristik ekstrak bit yang terlihat UV menunjukkan sensitivitas terhadap

panjang gelombang cahaya tampak, dengan pigmen betalain menunjukkan puncak penyerapan yang berbeda pada panjang gelombang tertentu (Lestari & Setiarso, 2021).

Penelitian mengenai studi sifat elektronik betanin dan senyawa turunannya mengungkapkan pergeseran merah dalam spektrum absorpsi bentuk terprotonasi betanin, akan menguntungkan DSSC karena tingkat energinya yang lebih rendah. Pergeseran ini dikaitkan dengan penggantian gugus asam karboksilat yang melekat pada kerangka pirolin dengan gugus fungsional donor elektron, yang mengarah pada peningkatan sifat elektronik. Pengenalan gugus fungsi -OC₆H₅ dengan rantai alkil menunjukkan kemampuan transfer muatan tinggi (QCT), dapat membantu mengurangi rekombinasi muatan pada permukaan TiO₂, yang pada akhirnya meningkatkan kinerja perangkat. Penemuan tersebut menunjukkan bahwa asam karboksilat yang melekat pada kerangka pirolin dalam betanin membatasi kinerjanya dalam DSSC. Dengan mengganti gugus pembatas ini dengan donor elektron, seperti -OC₆H₅, transfer muatan dan efisiensi perangkat dapat ditingkatkan secara signifikan (Damayanti et al., 2020).

Sreeja dan Pesala (2018) melakukan penelitian mengenai peningkatan efisiensi DSSC dengan melakukan ko-sensitisasi pigmen alami, betanin, dan klorofil, dengan spektrum penyerapan komplementer. Ko-sensitisasi betanin dengan klorofil menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan betanin dan klorofil secara individual. Peningkatan kinerja DSSC secara bersama dikaitkan dengan peningkatan kerapatan arus dan masa pakai elektron yang lebih lama, yang dikonfirmasi oleh spektroskopi impedansi elektrokimia (EIS). Rantai-rantai fitol hidrofobik klorofil bertindak sebagai lapisan pelindung untuk betanin, meningkatkan stabilitas sel surya terhadap degradasi yang diinduksi cahaya dan berkontribusi pada peningkatan efisiensi secara keseluruhan. Sementara itu, sel surya berbasis pigmen alami masih tertinggal dari DSSC berbasis rutenium konvensional dalam kinerjanya. Optimalisasi lebih lanjut disarankan, seperti menggunakan stabilisator dan teknik penyegelan, untuk meningkatkan masa pakai dan efisiensinya (Sreeja & Pesala, 2018).

KESIMPULAN

Betalain adalah pigmen alami yang memberikan warna merah-ungu (betasianin) dan

kuning-oranye (betaxanthin), yang banyak ditemukan pada tanaman seperti bit dan kaktus. Selain perannya sebagai pewarna, betalain memiliki manfaat kesehatan karena sifat antioksidan dan anti-inflamasi yang mendukung perlindungan terhadap penyakit degeneratif. Di industri pangan, kosmetik, dan Kesehatan banyak diminati, sejalan dengan *trend* menuju bahan alami yang lebih aman dan ramah lingkungan.

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian terkini telah fokus pada modifikasi struktur kimia betalain untuk meningkatkan stabilitas dan efisiensinya. Misalnya, teknik modifikasi struktural dengan substitusi gugus fungsional pada kerangka betalain telah berhasil meningkatkan stabilitas termal dan pH pigmen ini, yang memperpanjang masa simpan produk yang mengandung betalain. Inovasi ini didukung oleh teknik enkapsulasi terbaru, seperti penggunaan biopolimer dan nanopartikel, yang membantu mempertahankan warna dan aktivitas biologis betalain dalam kondisi penyimpanan yang ekstrem.

Selain aplikasi dalam pewarna dan suplemen, betalain dieksplorasi sebagai komponen dalam biosensor untuk deteksi penyakit. Sifat antioksidan betalain yang kuat dan kemampuan untuk berinteraksi dengan biomolekul, menjadikannya kandidat menarik untuk biosensor berbasis pigmen yang dapat mendeteksi stres oksidatif pada tingkat seluler atau keberadaan biomarker spesifik. Pengembangan biosensor berbasis betalain ini menunjukkan potensi besar dalam diagnostik medis dan teknologi kesehatan preventif.

Dengan perkembangan ini, betalain tidak hanya menawarkan warna alami yang menarik tetapi juga fungsi multifaset yang bermanfaat dalam kesehatan dan teknologi mutakhir, memperkuat posisinya sebagai bahan alami yang inovatif dengan aplikasi luas di berbagai industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, R. T. M., & Jameel, Q. Y. (2023). Red beetroot betalains as a novel source of colorant in ice-cream as compared with red dye 40 (E129). *Functional Foods in Health and Disease*, 13(4), 225–239. <https://doi.org/10.31989/ffhd.v13i4.1096>
- Butera, D., Tesoriere, L., Di Gaudio, F., Bongiorno, A., Allegra, M., Pintaudi, A. M., Kohen, R., & Livrea, M. A. (2002). Antioxidant activities of sicilian prickly pear (*Opuntia ficus indica*) fruit extracts and reducing properties of its betalains: Betanin and indicaxanthin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(23), 6895–6901. <https://doi.org/10.1021/jf025696p>
- Cahyani, N., & Sanjaya, I. G. M. (2021). Potensi Senyawa Betalain pada Ekstrak Biji Binahong Berbatang Merah (*Anredera cordifolia*) sebagai Fotosensitizer Dye Sensitized Solar Cell (DSSC). *Al-Kimia*, 9(2), 103–114. <https://doi.org/10.24252/al-kimia.v9i2.20610>
- Cardoso-Ugarte, G. A., Sosa-Morales, M. E., Ballard, T., Liceaga, A., & San Martín-González, M. F. (2014). Microwave-assisted extraction of betalains from red beet (*Beta vulgaris*). *Lwt*, 59(1), 276–282. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.05.025>
- Chethana, S., Nayak, C. A., & Raghavarao, K. S. M. S. (2007). Aqueous two phase extraction for purification and concentration of betalains. *Journal of Food Engineering*, 81(4), 679–687. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.12.021>
- Chhikara, N., Kushwaha, K., Sharma, P., Gat, Y., & Panghal, A. (2019). Bioactive compounds of beetroot and utilization in food processing industry: A critical review. *Food Chemistry*, 272, 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.022>
- Damayanti, Z. H., Anindika, G. R., Santoso, E., Akhlus, S., & Kusumawati, Y. (2020). The electronic properties study of betanin and their derivatives compound: An explanation to betanin limitation in DSSC application. *AIP Conference Proceedings*, 2237. <https://doi.org/10.1063/5.0005274>
- Driver, M. G., & Francis, F. J. (1979). Purification of Phytolaccanin (Betanin) by Removal of Phytolaccatoxin from *Phytolacca Americana*. *Journal of Food Science*, 44(2), 521–523. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1979.tb03826.x>
- Farika, A., Jauharina, L. M., Maulida, A. R., & Kristianingsih, I. (2024). *Aktivitas Antioksidan Lip Tint Kombinasi Buah Bit Dan*. 8(1), 1–9
- Fazadini, Safira Yulita; Ernawati, I. (2024).

- Karakteristik Fisik Sediaan Lip Cream dengan Pewarna Alami Ekstrak Beetroot (*Beta Vulgaris* L.). *Jurnal Media Komunikasi Ilmu Kesehatan*, 15(3), 38–44. <https://doi.org/doi.org/https://doi.org/10.38040/js.v16i1.896>
- Fitri, W., R.M, A., & Hestina. (2020). Formulasi Dan Uji Aktivitas Antioksidan Sediaan Lip Balm. *Jurnal Teknologi , Kesehatan Dan Ilmu Sosial*, 2(1), 161–167
- Gengatharan, A., Dykes, G. A., & Choo, W. S. (2015). Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. *Lwt*, 64(2), 645–649. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.052>
- Georgiev, V. G., Weber, J., Kneschke, E. M., Denev, P. N., Bley, T., & Pavlov, A. I. (2010). Antioxidant activity and phenolic content of betalain extracts from intact plants and hairy root cultures of the red beetroot *Beta vulgaris* cv. Detroit Dark Red. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65(2), 105–111. <https://doi.org/10.1007/s11130-010-0156-6>
- Hasuti, R. T., Rakhmayanti, R. D., & Lukito, P. I. (2016). Aktivitas Antioksidan Sediaan Lipstik Kombinasi Ekstrak Buah Naga Merah dan Umbi Bit. *Jurnal Kebidanan Dan Kesehatan Tradisional*, 5(2), 67–149.
- Henarejos-Escudero, P., Martínez-Rodríguez, P., Gómez-Pando, L. R., García-Carmona, F., & Gandía-Herrero, F. (2022). Formation of carboxylated and decarboxylated betalains in ripening grains of *Chenopodium quinoa* by a dual dioxygenase. *Journal of Experimental Botany*, 73(12), 4170–4183. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac151>
- Ilic, S., & Paunovic, V. (2019). Characteristics of curcumin dye used as a sensitizer in dye-sensitized solar cells. *Facta Universitatis - Series: Electronics and Energetics*, 32(1), 91–104. <https://doi.org/10.2298/fuee1901091i>
- Isah, K. U., Ahmadu, U., Idris, A., Kimpa, M. I., Uno, U. E., Ndamitso, M. M., & Alu, N. (2015). Betalain pigments as natural photosensitizers for dye-sensitized solar cells: The effect of dye pH on the photoelectric parameters. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 4(1), 5–9. <https://doi.org/10.1007/s40243-014-0039-0>
- Janiszewska, E. (2014). Microencapsulated beetroot juice as a potential source of betalain. *Powder Technology*, 264, 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.032>
- Jarvis, D. E., Ho, Y. S., Lightfoot, D. J., Schmöckel, S. M., Li, B., Borm, T. J. A., Ohyanagi, H., Mineta, K., Michell, C. T., Saber, N., Kharbatia, N. M., Rupper, R. R., Sharp, A. R., Dally, N., Boughton, B. A., Woo, Y. H., Gao, G., Schijlen, E. G. W. M., Guo, X., ... Tester, M. (2017). The genome of *Chenopodium quinoa*. *Nature*, 542(7641), 307–312. <https://doi.org/10.1038/nature21370>
- Jerz, G., Skotzki, T., Fiege, K., Winterhalter, P., & Wybraniec, S. (2008). Separation of betalains from berries of *Phytolacca americana* by ion-pair high-speed counter-current chromatography. *Journal of Chromatography A*, 1190(1–2), 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.02.093>
- Kabir, F., Nazmus Sakib, S., Shehab Uddin, S., Tawsif Efaz, E., & Farhan Himel, M. T. (2019). Enhance cell performance of DSSC by dye mixture, carbon nanotube and post TiCl₄ treatment along with degradation study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 35(July), 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.07.011>
- Khan, M. I. (2016). Plant Betalains: Safety, Antioxidant Activity, Clinical Efficacy, and Bioavailability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(2), 316–330. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12185>
- Kumar, S. S., Manoj, P., Shetty, N. P., Prakash, M., & Giridhar, P. (2015). Characterization of major betalain pigments -gomphrenin, betanin and isobetanin from *Basella rubra* L. fruit and evaluation of efficacy as a natural colourant in product (ice cream) development. *Journal of Food Science and Technology*, 52(8), 4994–5002. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1527-z>
- Lee, E. J., An, D., Nguyen, C. T. T., Patil, B. S., Kim, J., & Yoo, K. S. (2014). Betalain and betaine composition of greenhouse- or field-

- produced beetroot (*Beta vulgaris* L.) and inhibition of HepG2 cell proliferation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(6), 1324–1331. <https://doi.org/10.1021/jf404648u>
- Lestari, Elma; Setiarso, P. (2021). Studi Elektrokimia Ekstrak Betalain Umbi Bit Sebagai Pewarna Alami DSSC (Dye Sensitized Solar Cell). *UNESA Journal of Chemistry*, 10(3), 318–325.
- Martins, N., Roriz, C. L., Morales, P., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2017). Coloring attributes of betalains: A key emphasis on stability and future applications. *Food and Function*, 8(4), 1357–1372. <https://doi.org/10.1039/c7fo00144d>
- Mayangsari, N., Ananingsih, V. K., & Pratiwi, A. R. (2015). Stabilitas Pewarna Alami Serbuk Bit Merah Dalam Adonan Tepung Mocaf Selama Pengukusan. *UNIKA Soegijapranata*, 1–14.
- Mehita, C. S., Ishak, I., Bahri, S., Masrullita, M., & Nurlaila, R. (2021). Pengambilan Zat Betasianin Dari Kulit Buah Naga Merah (*Hylocereus Polyrhizus*) sebagai pewarna makanan alami dengan metode ekstraksi. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, 1(2), 107. <https://doi.org/10.29103/cejs.v1i2.4910>
- Mereddy, R., Chan, A., Fanning, K., Nirmal, N., & Sultanbawa, Y. (2017). Betalain rich functional extract with reduced salts and nitrate content from red beetroot (*Beta vulgaris* L.) using membrane separation technology. *Food Chemistry*, 215, 311–317. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.132>
- Moreno-Ley, C. M., Osorio-Revilla, G., Hernández-Martínez, D. M., Ramos-Monroy, O. A., & Gallardo-Velázquez, T. (2021). Anti-inflammatory activity of betalains: A comprehensive review. *Human Nutrition and Metabolism*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.hnm.2021.200126>
- Nelvita Mei Indah Sari, Atok Miftachul Hudha, W. P. (2016). Uji Kadar Betasianin Pada Buah Bit (*Beta Vulgaris* L.) Dengan Pelarut Etanol Dan Pengembangannya Sebagai Sumber Belajar Biologi. *Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia*, 2, 72–77
- Nirmal, N. P., Mereddy, R., & Maqsood, S. (2021). Recent developments in emerging technologies for beetroot pigment extraction and its food applications. *Food Chemistry*, 356(March), 129611. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129611>
- Nowacki, L., Vigneron, P., Rotellini, L., Cazzola, H., Merlier, F., Prost, E., Ralanairina, R., Gadonna, J. P., Rossi, C., & Vayssade, M. (2015). Betanin-Enriched Red Beetroot (*Beta vulgaris* L.) Extract Induces Apoptosis and Autophagic Cell Death in MCF-7 Cells. *Phytotherapy Research*, 29(12), 1964–1973. <https://doi.org/10.1002/ptr.5491>
- Obi, K., Frolova, L., & Fuierer, P. (2020). Preparation and performance of prickly pear (*Opuntia phaeacantha*) and mulberry (*Morus rubra*) dye-sensitized solar cells. *Solar Energy*, 208(August), 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.006>
- Oktaviani, A. E., & Krisnawati, M. (2019). Kelayakan Blush On Shimmer dengan Pewarna Alami Ekstrak Buah Bit Berbentuk Compact. *Beauty and Beauty Health Education Journal*, 8(2), 25–29. <https://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/bbhe/article/view/35411/22402>
- Omae, J. M., Goto, P. A., Rodrigues, L. M., dos Santos, S. S., Paraíso, C. M., Madrona, G. S., & de Cássia Bergamasco, R. (2017). Beetroot Extract Encapsulated in Inulin: Storage Stability and Incorporation in Sorbet. *Chemical Engineering Transactions*, 57, 1843–1848. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:59033403>
- Pasch, J. H., Von Elbe, J. H., & Sell, R. J. (1975). Betalaines as colorants in dairy products. *J.Milk Food Technol.*, 38(1), 25–28. <https://doi.org/10.4315/0022-2747-38.1.25>
- Patni, N., G. Pillai, S., & Sharma, P. (2020). Effect of using betalain, anthocyanin and chlorophyll dyes together as a sensitizer on enhancing the efficiency of dye-sensitized solar cell. *International Journal of Energy Research*, 44(13), 10846–10859. <https://doi.org/10.1002/er.5752>
- Prabavathy, N., Shalini, S., Balasundaraprabhu, R., Velauthapillai, D., Prasanna, S., & Muthukumarasamy, N. (2017).

- Enhancement in the photostability of natural dyes for dye-sensitized solar cell (DSSC) applications: a review. *International Journal of Energy Research*, 41(10), 1372–1396. <https://doi.org/10.1002/er.3703>
- Rahimi, P., Abedimanesh, S., Mesbah-Namin, S. A., & Ostadrahimi, A. (2019). Betalains, the nature-inspired pigments, in health and diseases. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(18), 2949–2978. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1479830>
- Rahimi, P., Mesbah-Namin, S. A., Ostadrahimi, A., Separham, A., & Asghari Jafarabadi, M. (2019). Betalain- and betacyanin-rich supplements' impacts on the PBMC SIRT1 and LOX1 genes expression and Sirtuin-1 protein levels in coronary artery disease patients: A pilot crossover clinical trial. *Journal of Functional Foods*, 60(June), 103401. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.06.003>
- Sadowska-Bartosz, I., & Bartosz, G. (2021). Biological properties and applications of betalains. *Molecules*, 26(9), 1–36. <https://doi.org/10.3390/molecules26092520>
- Sari, Y., Santoni, A., & Elisabet, E. (2018). Comparative Test of Color Stability between Betalain Pigments of Red Dragon Fruits and Anthocyanin Pigments from Tamarillo Fruit at Various pH. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 21(3), 107–112. <https://doi.org/10.14710/jksa.21.3.107-112>
- Seca, A. M. L., & Pinto, D. C. G. A. (2018). Plant secondary metabolites as anticancer agents: Successes in clinical trials and therapeutic application. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(1). <https://doi.org/10.3390/ijms19010263>
- Selig, M. J., Celli, G. B., Tan, C., La, E., Mills, E., Webley, A. D., Padilla-Zakour, O. I., & Abbaspourrad, A. (2018). High pressure processing of beet extract complexed with anionic polysaccharides enhances red color thermal stability at low pH. *Food Hydrocolloids*, 80, 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.025>
- Setiawan, M. A. W., Nugroho, E. K., & Lestario, L. N. (2016). Ekstraksi Betasianin Dari Kulit Umbi Bit (*Beta vulgaris*) Sebagai Pewarna Alami. *Agric*, 27(1), 38. <https://doi.org/10.24246/agric.2015.v27.i1.p38-43>
- Shafira, N., Ayu, P. R., & Susianti. (2019). Potensi Bit Merah (*Beta vulgaris* L.) sebagai Nefroprotektor dari Kerusakan Ginjal akibat Radikal Bebas The Potential of Beetroots (*Beta vulgaris* L.) as Nephroprotector from Kidney Damage due to Free Radicals. *MEDULA: Medical Profession Journal of Universitas Lampung*, 9(2), 322–327
- Smeriglio, A., De Francesco, C., Denaro, M., & Trombetta, D. (2021). Prickly Pear Betalain-Rich Extracts as New Promising Strategy for Intestinal Inflammation: Plant Complex vs. Main Isolated Bioactive Compounds. *Frontiers in Pharmacology*, 12(September), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.722398>
- Son, H. J., Prasittichai, C., Mondloch, J. E., Luo, L., Wu, J., Kim, D. W., Farha, O. K., & Hupp, J. T. (2013). Dye stabilization and enhanced photoelectrode wettability in water-based dye-sensitized solar cells through post-assembly atomic layer deposition of TiO₂. *Journal of the American Chemical Society*, 135(31), 11529–11532. <https://doi.org/10.1021/ja406538a>
- Sreeja, S., & Pesala, B. (2018). Co-sensitization aided efficiency enhancement in betanin – chlorophyll solar cell. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 7(25). <https://doi.org/doi.org/10.1007/s40243-018-0132-x>
- Srivastava, A., Satrughna, J. A. K., Tiwari, M. K., Kanwade, A., Yadav, S. C., Bala, K., & Shirage, P. M. (2022). Effect of Ti_{1-x}Fe_xO₂ photoanodes on the performance of dye-sensitized solar cells utilizing natural betalain pigments extracted from *Beta vulgaris* (BV). *Energy Advances*, 2(1), 148–160. <https://doi.org/10.1039/d2ya00197g>
- Sukma, A. A. T. W. (2018). Pembuatan Liptint dari Ekstrak Buah Bit. *Beauty and Beauty Health Education Journal*, 7(1), 18–22
- Tesoriere, L., Butera, D., D'Arpa, D., Di Gaudio, F., Allegra, M., Gentile, C., & Livrea, M. A. (2003). Increased resistance to oxidation of betalain-enriched human low density

- lipoproteins. *Free Radical Research*, 37(6), 689–696.
<https://doi.org/10.1080/1071576031000097490>
- Timoneda, A., Feng, T., Sheehan, H., Walker-Hale, N., Pucker, B., Lopez-Nieves, S., Guo, R., & Brockington, S. (2019). The evolution of betalain biosynthesis in Caryophyllales. *New Phytologist*, 224(1), 71–85.
<https://doi.org/10.1111/nph.15980>
- Tsimberidou, A. M. (2015). Targeted therapy in cancer. *Cancer Chemotherapy and Pharmacology*, 76(6), 1113–1132.
<https://doi.org/10.1007/s00280-015-2861-1>
- Visockis, M., Bobinaitė, R., Ruzgys, P., Barakauskas, J., Markevičius, V., Viškelis, P., & Šatkauskas, S. (2021). Assessment of plant tissue disintegration degree and its related implications in the pulsed electric field (PEF)-assisted aqueous extraction of betalains from the fresh red beetroot. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 73(November 2019).
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102761>
- Wendel, M., Kumorkiewicz, A., Wybraniec, S., Ziótek, M., & Burdziński, G. (2017). Impact of S1→S0 internal conversion in betalain-based dye sensitized solar cells. *Dyes and Pigments*, 141, 306–315.
<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.02.026>
- Yin, Z., Yang, Y., Guo, T., Veeraraghavan, V. P., & Wang, X. (2021). Potential chemotherapeutic effect of betalain against human non-small cell lung cancer through PI3K/Akt/mTOR signaling pathway. *Environmental Toxicology*, 36(6), 1011–1020. <https://doi.org/10.1002/tox.23100>
- Zaky, M., Pratiwi, D., & Saripah, S. (2023). Potensi Ekstrak Umbi Bit (*Beta Vulgaris* L.) sebagai Pewarna rambut dalam Formulasi Sediaan Gel. *Parapemikir: Jurnal Ilmiah Farmasi*, 12(2), 265.
<https://doi.org/10.30591/pjif.v12i2.5122>
- Zin, M. M., Anucha, C. B., & Bánvölgyi, S. (2020). Recovery of phytochemicals via electromagnetic irradiation (Microwave-Assisted-Extraction): Betalain and phenolic compounds in perspective. *Foods*, 9(7).
<https://doi.org/10.3390/foods9070918>
- Zannou, O., Oussou K.F., Chabi, I.B., Odouaro, O.B., Deli, M. G. E. P., Goksen, G., Vahid, A. M., Kayode, A.A.P.P., Kelebek, H., Selli, S., & Galanakis, C. M. (2024). A comprehensive review of recent development in extraction and encapsulation techniques of betalains. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(30), 11263–11280.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2235695>