



Homepage Journal: <https://jurnal.unismuhpalu.ac.id/index.php/JKS>

Studi Literatur Stabilitas Fikosianin dalam Berbagai Agen Penstabil untuk Aplikasi Pangan pH Rendah

Literature Study on the Stability of Phycocyanin in Various Stabilizing Agents for Low-pH Food Applications

Fathika Fitriana¹, M. Farras Abiyyuddin¹, Jasmine Rahma Kesuma Nirvana¹

¹Universitas Jember,

*Corresponding Author: E-mail: fathikafnia@unej.ac.id

Artikel Review

Article History:

Received: 05 Sep, 2025

Revised: 04 Oct, 2025

Accepted: 17 Nov, 2025

Kata Kunci:

Fikosianin;
Stabilitas;
pH rendah

Keywords:

Phycocyanin;
Stability;
Low pH;

DOI: [10.56338/jks.v8i11.9257](https://doi.org/10.56338/jks.v8i11.9257)

ABSTRAK

Fikosianin (PC) adalah pewarna biru alami yang potensial, namun aplikasinya terhambat oleh sensitivitasnya yang tinggi terhadap kondisi asam ($\text{pH} < 4.5$), panas, dan cahaya. Ketidakstabilan ini memicu denaturasi protein PC dan degradasi warna yang kurang menguntungkan pada aplikasi produk pangan. Studi literatur ini bertujuan untuk mensintesis data penelitian terdahulu dan mengkategorikan upaya stabilisasi PC menggunakan agen penstabil kimia dan teknologi fisik. Pencarian sistematis dan analisis kualitatif dilakukan terhadap 11 artikel yang terbit di tahun 2018-2025 dengan fokus pada retensi warna di kondisi pH asam. Studi literatur ini mengkategorikan agen penstabil kimia menjadi lima golongan yaitu, protein, polisakarida, kompleks polisakarida-protein, dan bahan *non-food grade* seperti SDS dan formaldehida. Penggunaan karagenan anionik dinilai signifikan terhadap stabilitas PC secara simultan pada pH 3.0 dan suhu tinggi. Kombinasi lebih dari satu agen penstabil menunjukkan efektivitas tinggi dengan retensi warna mencapai 81.5% pada pH 3.5. Teknologi fisik seperti *spray drying*, *freeze drying*, dan *high-pressure processing* (HPP) dapat dipertimbangkan untuk mempertahankan stabilitas PC. Secara keseluruhan studi literatur ini merekomendasikan kombinasi strategi antara agen penstabil kimia dengan teknologi fisik secara bersamaan. Pengetahuan ini sangat bermanfaat di level industri sebab berkaitan pula dengan efisiensi produksi PC.

ABSTRACT

Phycocyanin (PC) is a potential natural blue colorant, but its application is hindered by its high sensitivity to adverse conditions such as acidic ($\text{pH} < 4.5$), heat, and light. This instability triggers PC's protein denaturation and color degradation, which limits its application in food products. This literature study aims to synthesize existing research data and categorize the stabilization efforts of PC using chemical stabilizing agents and physical technologies. A systematic search and qualitative analysis were performed on 11 articles published between 2018-2025, focusing primarily on color retention in acidic conditions. The study categorizes chemical stabilizing agents into four main groups: proteins, polysaccharides, protein-polysaccharide complexes, and non-food-grade materials (such as SDS and formaldehyde). The use of anionic carrageenan is considered significant for simultaneously enhancing PC stability at pH 3.0 and high temperatures. Furthermore, the combination of multiple stabilizing agents has shown high effectiveness, with color retention reaching 81.5% at pH 3.5. Physical technologies like spray drying, freeze drying, and High-Pressure Processing (HPP) can be utilized to maintain PC stability. Overall, this literature study recommends a combined strategy involving both chemical stabilizing agents and physical technologies. This knowledge is highly beneficial at the industry level as it relates directly to PC production efficiency.

PENDAHULUAN

Seiring dengan pergeseran tren global menuju *back to nature*, permintaan konsumen terhadap pewarna alami untuk produk pangan terus meningkat, menggantikan pewarna sintetis yang seringkali menimbulkan kekhawatiran kesehatan. Pewarna alami dari mikroalga

menawarkan keunggulan yaitu sifatnya yang relatif aman dikonsumsi, mendukung keberlanjutan, dan memberikan manfaat nutrasetikal. Fikosianin (PC), yang umumnya diekstrak dari mikroalga *Spirulina platensis*, adalah salah satu pewarna biru alami komersial yang telah disetujui oleh FDA dan EFSA. Sebagai kompleks protein-pigmen yang larut air, PC tidak hanya memberikan warna biru cerah, tetapi juga dikenal memiliki aktivitas antioksidan, anti-inflamasi, dan imunomodulator (Campos Assumpção de Amarante et al., 2020; Newsome et al., 2014; Pez Jaeschke et al., 2021).

Stabilitas PC sangat sensitif dan dipengaruhi oleh faktor intrinsik (agregasi protein, konsentrasi, dan kemurnian pigmen) maupun ekstrinsik (cahaya, suhu dan pH lingkungan). Meskipun memiliki potensi besar, stabilitas PC dalam formulasi pangan, khususnya pada lingkungan asam (pH rendah, yaitu $\text{pH} < 4.5$), masih menjadi tantangan utama. Kondisi pH rendah memicu protein PC cenderung mengalami denaturasi dan pemisahan subunit, yang pada akhirnya mengakibatkan degradasi kromofor dan memudarnya warna biru. Ketidakstabilan ini membatasi penggunaannya pada produk pangan asam seperti minuman sari buah, *yoghurt*, atau permen (Goyudianto et al., 2021; Nowruzi et al., 2022). Oleh karena itu, eksplorasi agen penstabil sangat penting untuk memperluas aplikasi PC. Tujuan dari studi literatur ini adalah untuk identifikasi dan kategorisasi secara sistematis jenis-jenis agen penstabil (seperti hidrokoloid, protein, polisakarida, dan berbagai teknik enkapsulasi) yang telah diteliti untuk meningkatkan stabilitas PC. Selain itu, studi literatur ini juga mengkaji efektivitas, dosis optimal dan mekanisme proteksi molekuler dari masing-masing agen penstabil, dengan fokus utama pada peningkatan retensi warna pada kondisi pH rendah.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *literature review* yang bertujuan untuk mengkompilasi dan mensintesis penelitian ilmiah terkini mengenai upaya peningkatan stabilitas fikosianin (PC). Pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada basis data Scopus, ScienceDirect, dan Google Scholar. Pencarian menggunakan kombinasi kata kunci (*keyword*) seperti *Phycocyanin*, *C-PC*, *Stability*, *Stabilisation*, dan *Stabilizing agent* dengan membatasi periode publikasi tahun 2018-2025, untuk memastikan informasi terkini. Tahap kedua melibatkan penelusuran lebih lanjut menggunakan alat bantu berbasis kecerdasan buatan, yaitu *Research Rabbit*, untuk melakukan analisis sitasi maju dan mundur (*forward and backward citation analysis*). *Research Rabbit* digunakan untuk mengidentifikasi jaringan penelitian terkait dan memperluas cakupan studi berdasarkan artikel-artikel kunci yang telah ditemukan pada tahap pertama (Molopa, 2024). Kriteria inklusi utama pada penelitian ini adalah artikel jurnal *peer-reviewed* yang secara eksplisit membahas studi stabilitas PC menggunakan agen penstabil dan yang menguji faktor-faktor pendegradasi PC seperti kondisi pH rendah, suhu tinggi dan paparan cahaya. Sementara artikel berupa review, abstrak konferensi, paten atau yang hanya berfokus pada ekstraksi dan purifikasi dikecualikan (Eksklusi). Prosedur seleksi artikel mengikuti modifikasi dari diagram alir PRISMA, yaitu artikel disaring secara bertahap berdasarkan judul, abstrak dan kemudian teks lengkap (Stovold et al. 2014). Data dari artikel yang terpilih kemudian dianalisis melalui sintesis kualitatif, berfokus pada efektivitas proteksi terhadap pigmen, konsentrasi agen penstabil optimal yang dibutuhkan, serta kondisi pH dan suhu yang digunakan dalam pengujian.

HASIL

Berdasarkan prosedur *literature review* yang sudah dilakukan, diperoleh 23 artikel hasil pencarian *keywords* dan seleksi abstrak. Setelah dilakukan penelusuran mendalam didapat 11 artikel yang masuk ke dalam kriteria inklusi (Tabel 1). Hasil sintesis data membagi jenis agen penstabil dan jenis teknologi pemrosesan fikosianin yang menjadi bahan diskusi mengenai efeknya terhadap stabilitas fikosianin PC (Tabel 2).

Tabel 1. Daftar Artikel Hasil Pencarian *Keywords* dan Seleksi Abstrak

No.	Peneliti	Tahun	Fokus Penelitian	Kriteria
1.	Falkeborg et al.	2018	Efek penggunaan misel anionik terhadap stabilitas fikosianin.	Inklusi
2.	Lemos et al.	2020	Enkapsulasi dengan pati modifikasi terhadap stabilitas fikosianin.	
3.	Munawaroh et al.	2020	Fotostabilisasi melalui modifikasi formaldehida.	
4.	Pan-utai & Iamtham	2020	Mikroenkapsulasi fikosianin dengan <i>freeze drying</i> menggunakan enkapsulat berbeda.	
5.	İlter et al.	2021	Peningkatan stabilitas melalui mikroenkapsulasi <i>spray drying</i> .	
6.	Li et al.	2021	Peningkatan stabilitas termal dalam kondisi asam dengan kompleks polisakarida.	
7.	Zhang et al.	2021	Protein whey meningkatkan stabilitas dalam kondisi asam selama penyimpanan fikosianin.	
8.	Zhang et al.	2020	Peningkatan stabilitas koloidal dalam kondisi asam menggunakan interaksi protein whey.	
9.	Schmatz et al.	2020	Enkapsulasi dengan <i>electrospraying</i> .	
10.	Zhang et al.	2021	Peningkatan stabilitas penyimpanan dalam minuman dengan pemrosesan tekanan tinggi.	
11.	Pradeep & Nayak	2019	Peningkatan stabilitas fikosianin melalui enkapsulasi ekstrusi.	
12.	Selin et al.	2025	Kajian stabilitas fitokimia dan fisik dalam produk cheesecake.	Eksklusi

13.	Adjali et al.	2021	Tinjauan singkat degradasi fisikokimia dan cara meningkatkan stabilitas fikosianin.
14.	Nowruzi et al.	2022	Stabilitas fikosianin dalam kondisi lingkungan yang merugikan pada penyimpanan makanan.
15.	Böcker et al.	2020	Perubahan fungsional dan struktural terkait waktu-suhu.
16.	Yuan et al.	2022	Tinjauan strategi terbaru untuk meningkatkan stabilitas fisik.
17.	Prasetyaningrum et al.	2024	Tinjauan enkapsulasi dalam kitosan karboksimetil dan protein whey untuk stabilitas.
18.	Buecker et al.	2022	Efek kompleksasi λ -karagenan pada stabilitas warna biru terhadap denaturasi termal dan asam.
19.	Yu et al.	2022	Pengiriman gabungan astaxanthin dan phycocyanin menggunakan emulsi ganda (W/O/W).
20.	Li et al.	2022	Peningkatan kelarutan dan sifat fungsional dalam kondisi asam.
21.	Yang et al.	2022	Pembentukan kompleks phycocyanin-EGCG untuk perlindungan warna terhadap cahaya.
22.	Faieta et al.	2020	Peran sakarida pada stabilitas termal.

Tabel 2. Jenis Agen Penstabil Dan Teknologi Pemrosesan Dan Efeknya Terhadap Stabilitas Fikosianin.

No.	Peneliti	Agen Penstabil	Teknologi Pemrosesan	Efek stabilitas fikosianin (PC)
1	Zhang et al. (2019)	Whey Protein Isolate (WPI)	High-pressure processing (HPP)	Kombinasi agen penstabil WPI dan tekanan tinggi dapat meningkatkan stabilitas fikosianin
2	Munawaroh et al. (2020)	Formaldehida	Modifikasi Kimia	Ikatan silang kovalen pada fikosianin dapat meningkatkan fotostabilitas

3	Pan-Utai et al. (2020)	Gum arab dan maltodekstrin	<i>Freeze drying</i>	Optimasi bahan penyalut meningkatkan efisiensi enkapsulasi (99%) dan kualitas fisik serbuk.
4	Li et al. (2021)	Karagenan anionik	Modifikasi kimia	Kompleksasi elektrostatis memberikan perlindungan fikosianin secara simultan terhadap pH rendah dan suhu tinggi.
5	Zhang et al. (2021)	WPI dan Karagenan	HPP	Kombinasi WPI-karagenan dengan teknologi HPP meningkatkan stabilitas fikosianin.
6	Zhang et al. (2020)	WPI	Modifikasi kimia	Fraksi β -laktoglobulin dan α -laktalbumin WPI dari susu adalah fraksi yang paling optimal meningkatkan stabilitas fikosianin.
7	Zhang et al. (2021)	CMC dan WPI	Modifikasi kimia	Kombinasi CMC dan WPI dapat meningkatkan stabilitas fikosianin.
8	Lemos et al. (2020)	Pati Kentang Ikatan Silang	<i>Freeze drying</i>	Terjadi pembentukan matriks hidrogel yang kaku untuk <i>controlled release</i> cocok untuk aplikasi farmasi/pangan fungsional.
9	Ilter et al. (2021)	Gum arab dan WPI	<i>Spray drying</i>	Kombinasi gum arab dan wpi menjadi enkapsulat yang menghasilkan fikosianin dengan stabilitas terbaik.
10	Falkeborg et al. (2018)	SDS	Modifikasi kimia	Molekul bermuatan anion memiliki efek perlindungan terhadap molekul fikosianin pada pH 3.
11	Pradeep et al. (2019)	Kalsium Alginat	Freeze drying	Kalsium alginat membentuk matriks hidrogel dan memberikan efek perlindungan termal fikosianin pada pH 4.5 – 7.0

DISKUSI

Peran Agen Penstabil Terhadap Stabilitas Fikosianin Protein

Berdasarkan studi literatur dari penelitian yang masuk kriteria inklusi, *Whey Protein Isolate* (WPI) merupakan agen penstabil berbasis protein yang banyak diteliti dan memberikan efek signifikan terhadap stabilitas fikosianin (PC). Agen penstabil WPI memiliki peran penting terhadap stabilitas fikosianin dengan berinteraksi langsung dengan PC melalui kompleksasi protein-protein dan pelapisan sterik. Penelitian Zhang et al. (2021) memvalidasi bahwa WPI efektif mengurangi agregasi dan presipitasi koloid PC pada pH 3.0. Berdasarkan Morya et al. (2023), PC pada pH 3.0 mendekati titik isoelektriknya yang menyebabkan molekulnya kehilangan muatan dan saling tarik-menarik (menggumpal), serta menurunkan kelarutannya terhadap air. WPI dilaporkan terbukti mampu mencegah agregasi ini yang ditunjukkan dengan nilai retensi warna biru mencapai 98% (hampir tidak ada kehilangan warna). Nilai ini dicapai pada konsentrasi WPI minimal 1% b/v yang ditambahkan ke larutan PC pada pH 3.0 setelah penyimpanan selama lima hari di bawah paparan cahaya. Berdasarkan penelitian Zhang et al. (2021), WPI terutama fraksi β -*laktoglobulin* dan α -*laktalbumin* yang diperoleh dari susu, menunjukkan kinerja yang lebih unggul dalam menstabilkan PC dibandingkan dengan sumber protein lain seperti protein kacang polong atau protein putih telur ditinjau dari retensi warna yang dihasilkan.

Menurut Zhang et al. (2021), pada pH 3.0 PC dan WPI dapat membentuk kompleks melalui interaksi elektrostatis dan interaksi hidrofobik. Meskipun WPI dapat terdenaturasi pada pH 3.0, akan tetapi WPI yang terdenaturasi dapat melipat dan menempel di sekitar molekul PC, membentuk lapisan pelindung fisik yang tebal. Lapisan ini berperan sebagai *barrier sterik* yang secara fisik mencegah molekul PC untuk saling bertabrakan dan menggumpal, sehingga menjaga stabilitas koloid dan warna biru. Efektivitas WPI dipengaruhi oleh konsentrasinya. Studi yang dilakukan oleh Zhang et al. (2021) menetapkan konsentrasi WPI minimal adalah 1% yang dibutuhkan untuk secara menyeluruh mencegah agregasi PC pada pH 3.0. Zhang et al. (2021) menyatakan bahwa konsentrasi WPI dibawah 1% diduga tidak cukup untuk melapisi semua molekul PC sehingga masih terjadi agregasi parsial.

Polisakarida

Polisakarida adalah agen penstabil yang banyak diteliti tidak hanya efeknya terhadap stabilitas PC namun juga bahan lain seperti sebagai bahan pengental, penstabil dan emulsifier produk pangan maupun non pangan (Herawati, 2018). Hal tersebut didasari oleh kemampuannya membentuk film, dan kemampuan membentuk muatan anionik (negatif) yang kuat. Polisakarida yang dapat dikaji potensinya sebagai agen penstabil PC adalah karagenan dan CMC (Li et al. 2021). Berdasarkan studi Li et al. (2021) karagenan yang diberi muatan (*ι -carrageenan*) merupakan agen penstabil PC yang unggul pada kondisi pH asam dan suhu tinggi secara simultan. Jenis karagenan yang digunakan pada penelitian tersebut bermuatan negatif (anionik) karena adanya modifikasi berupa penambahan gugus sulfat pada karagenan, senyawa hasil modifikasi kemudian di beri kode sebagai *ι -carrageenan*. Penelitian tersebut menyatakan bahwa PC bermuatan positif pada pH 3.0, sedangkan *ι -carrageenan* memiliki muatan negatif yang kuat, maka terbentuk ikatan elektrostatis yang sangat erat dengan PC. Ikatan kuat ini menghasilkan kompleks larut air

yang sangat stabil, mencegah agregasi PC dan mempertahankan warna biru bahkan setelah dipanaskan hingga suhu 80°C di lingkungan asam. Polisakarida bermuatan *i-carrageenan* pada penelitian Li et al. menunjukkan efisiensi pengikatan kromofor yang tinggi, secara fisik menghalangi proton H⁺ untuk menyerang pigmen PC yang merupakan penyebab utama pergeseran warna dari biru menjadi hijau di pH rendah. Studi ini juga menunjukkan keunggulan dari penggunaan agen penstabil bermuatan yang berbanding lurus dalam kecepatannya mengikat senyawa target. Pengetahuan ini sangat bermanfaat di level industri sebab berkaitan pula dengan efisiensi produksi, dan proses yang lebih cepat semakin menguntungkan.

Jenis polisakarida lain yang berpotensi menjadi agen penstabil PC adalah karboksimetil selulosa (CMC). Meski demikian, CMC pada studi stabilitas PC jarang digunakan sendiri, melainkan dicampur dengan bahan lain seperti pada penelitian Prasetyaningrum et al. (2024) yang memadukan penggunaan CMC dengan *Whey Protein Isolate* (WPI) untuk membentuk kompleks ganda pada pH 3.5, yang akan dijelaskan pada subbab berikutnya. Polisakarida dapat pula digunakan sebagai agen penstabil berbasis enkapsulasi. Mekanisme ini berfokus pada perlindungan termal dan pelepasan terkontrol (*controlled release*) molekul PC. Penelitian Pradeep dan Nayak (2019) serta Lemos et al. (2020) masing-masing menggunakan polisakarida sebagai enkapsulat PC. Penelitian Pradeep dan Nayak (2019) menggunakan polisakarida dalam bentuk kalsium alginat dan menunjukkan bahwa alginat dapat membentuk matriks hidrogel yang keras dengan berinteraksi dengan ion kalsium (Ca²⁺), sehingga dapat membentuk barrier fisik di sekitar PC. Teknologi ini terbukti dapat mempertahankan 88.19% warna biru setelah dipanaskan pada suhu 80°C di kondisi pH 4.5 sampai 7.0.

Penelitian lain oleh Lemos et al. (2020) menggunakan pati kentang termodifikasi sebagai agen penstabil PC. Berdasarkan penelitian tersebut diketahui bahwa mekanisme pati sebagai agen penstabil PC adalah melalui ikatan silang pada pati yang dapat menghasilkan jaringan hidrogel yang kokoh, tidak mudah larut maupun membengkak sehingga meningkatkan sifat penahan dan pelepasan terkontrol (*controlled release*) molekul PC. Adapun aplikasi dari hasil penelitian tersebut mengarah pada bidang farmasi seperti untuk meningkatkan daya cerna PC setelah melalui berbagai kondisi pencernaan termasuk kondisi asam pada lambung. Meski demikian, studi ini menunjukkan kemampuan pati termodifikasi sebagai bahan matriks fisik yang stabil secara struktural, yang secara teori dibutuhkan untuk aplikasi pangan pH rendah. Penelitian lain oleh Pan-utai dan Iamtham (2020) menggunakan gum arab dan maltodekstrin sebagai enkapsulat PC. Mekanisme gum arab dan maltodekstrin mengarah kepada kemampuan bahan tersebut sebagai pembentuk film dan sebagai bahan pengisi.

Kompleks polisakarida-protein

Pendekatan kompleksasi polisakarida-protein bertujuan untuk mengatasi keterbatasan agen tunggal seperti polisakarida murni yang kurang efektif dalam enkapsulasi termal, dan protein murni yang rentan terhadap denaturasi di titik isoelektrik. Kompleks ini membentuk sistem perlindungan ganda baik secara elektrostatis maupun fisik. Prasetyaningrum et al. (2024) menguji kompleks antara karboksimetil selulosa (CMC) dan *Whey Protein Isolate* (WPI). Penelitian tersebut menggunakan CMC sebagai polisakarida anionik bermuatan negatif kuat dan WPI sebagai protein yang juga bermuatan namun muatannya sangat sensitif terhadap pH. Kompleksasi CMC-WPI diuji pada pH 3.5 karena pada kondisi ini, WPI

memiliki muatan positif dan CMC memiliki muatan negatif. Interaksi elektrostatik yang kuat antara muatan berlawanan ini membentuk kompleks ganda yang lebih stabil, sehingga ketika kompleks ini berinteraksi dengan fikosianin (PC), terbentuk lapisan pelindung yang lebih kokoh. Kompleks ini secara signifikan meningkatkan stabilitas PC terhadap pH asam (pH 3.5), terhadap pemanasan, dan terhadap degradasi akibat sinar UV. Hal ini ditunjukkan dari perbandingan retensi warna antara penggunaan CMC tunggal (35%), WPI tunggal (50%) dan kompleks CMC-WPI (81.5%).

Sodium Dodecyl Sulfate (SDS)

SDS diketahui merupakan surfaktan anionik (deterjen) dan umumnya tidak dianggap sebagai bahan yang *food-grade*. Oleh karena itu pembahasan mengenai bahan ini mengarah pada penjelasan mekanis tentang cara SDS mengatasi degradasi warna fikosianin (PC) di pH rendah. Salah satu indikator degradasi PC adalah perubahan warna PC di pH rendah (pH 3.0 – 4.0) yang secara visual terlihat perubahannya dari warna biru menjadi warna hijau. Di lingkungan asam, proton H^+ berikatan dengan gugus kromofor PC sehingga terjadi protonasi yang menyebabkan PC melipat dan kromofor terurai sebagian. Hal ini mengakibatkan pergeseran warna dari panjang gelombang 620 nm (warna biru) ke panjang gelombang yang lebih panjang (warna hijau). Falkeborg et al. (2018) menunjukkan bahwa SDS secara kimiawi dapat mengurangi proses protonasi tersebut. SDS adalah molekul yang memiliki kepala bermuatan negatif (anionik) dan ekor hidrofobik. Di atas konsentrasi tertentu (*Critical Micelle Concentration*), molekul-molekul ini akan beragregasi membentuk misel anionik. Berdasarkan Falkeborg et al. (2018) pada konsentrasi 0,7% SDS membentuk misel yang memiliki muatan permukaan negatif yang sangat kuat. Kaitannya dengan kemampuan stabilisasi PC adalah bahwa molekul PC yang sensitif terhadap asam dapat berinteraksi dengan misel anionik SDS. Misel tersebut selanjutnya menjebak struktur PC sedangkan muatan negatif yang ada pada permukaan misel bertindak sebagai perisai elektrostatik yang menghalangi proton (H^+) yang berada di luar misel. Hal ini ditunjukkan secara kualitatif melalui perbedaan warna antara PC tanpa SDS dengan PC dengan SDS 0,7% yang menunjukkan bahwa PC dengan SDS memiliki warna biru yang stabil.

Meskipun SDS tidak dapat digunakan dalam produk pangan, namun studi ini membuktikan bahwa agen dengan muatan negatif yang sangat kuat dapat menstabilkan PC di pH rendah. Hal ini secara langsung mendukung temuan tentang agen penstabil *food-grade* seperti *ι-carrageenan* yang juga merupakan polisakarida anionik (Li et al. 2021), dan kompleks CMC-WPI yang mengandalkan muatan negatif CMC (Prasetyaningrum et al. 2024). Penelitian mengenai SDS juga dapat dijadikan dasar penelitian untuk mencari surfaktan atau hidrokoloid *food-grade* lain yang bermuatan anionik kuat sebagai agen penstabil PC.

Formaldehida

Berbeda dengan agen penstabil lain yang dibahas pada subbab sebelumnya, studi yang menggunakan formaldehida bertujuan untuk meningkatkan stabilitas PC melalui ikatan silang kovalen langsung pada molekul protein fikosianin (PC) (Munawaroh et al., 2020). Formaldehida adalah agen pengikat silang yang kuat dan mampu bereaksi dengan gugus amina pada protein PC. Ikatan silang antara PC dan formaldehida menghasilkan molekul baru yang disebut phycocyanin-formaldehida (PC-F). Ikatan kovalen ini secara efektif mengubah struktur tersier PC secara permanen, membuatnya lebih kaku dan tahan terhadap

perubahan lingkungan. Perubahan kimia dan struktur PC-F dikonfirmasi melalui dua metode yakni melihat pergeseran panjang gelombang menggunakan spektrofotometer UV-Vis dan analisis FTIR. Melalui pengukuran spektrofotometer UV-Vis, spektrum absorbansi PC bergeser 10 nm lebih pendek menjadi 611 nm setelah penambahan formaldehida. Pergeseran ini menunjukkan bahwa ikatan silang telah terjadi dan mengubah gugus kromofor PC yang berpotensi menyebabkan PC melipat lebih rapat. Sementara itu, hasil analisis menggunakan FTIR menunjukkan puncak-puncak baru yang mengonfirmasi adanya interaksi dan pembentukan ikatan antara PC dan formaldehida.

Meskipun formaldehida tidak *food-grade* akan tetapi studi yang dilakukan oleh Munawaroh et al. (2020) membuktikan bahwa modifikasi struktur protein PC dapat menjadi strategi peningkatan stabilitas PC. Studi ini menciptakan gap penelitian yang mendalam tentang diperlukannya agen pengikat silang *food-grade* seperti genipin (Wu et al. 2023) dan transglutaminase enzimatis (Xu et al., 2018) untuk dapat mencapai stabilisasi yang sama tanpa masalah keamanan. Hasil temuan penelitian Munawaroh et al. (2020) didasari oleh pengujian fotostabilitas PC dengan berbagai jenis cahaya, akan tetapi tidak melakukan pengujian terhadap pH asam. Selain itu ditinjau dari efektivitas dan keamanannya, modifikasi eksternal seperti melalui proses enkapsulasi dan kompleksasi saat ini lebih aman dan lebih efektif untuk peningkatan stabilitas PC.

Pengaruh Teknologi Fisik Terhadap Stabilitas Fikosianin

Teknologi pengeringan suhu rendah (*Freeze drying*)

Studi kriteria inklusi pada penelitian ini yang menggunakan *freeze drying* sebagai teknologi proses dalam strategi stabilisasi PC diantaranya dilakukan oleh Lemos et al. (2020) dan Pan utai et al. (2020). Dasar pemilihan teknologi *freeze drying* adalah karena karakteristik utamanya yakni pemrosesan suhu rendah. Peran penting *freeze drying* adalah melindungi PC dari panas melalui proses sublimasi (perubahan dari es langsung menjadi uap) pada kondisi vakum tinggi dan suhu beku. Keuntungan penggunaan *freeze drying* dalam hal menjaga stabilitas PC adalah bahwa PC merupakan protein yang sangat sensitif terhadap panas, maka penggunaan suhu tinggi dapat menyebabkan denaturasi termal dan hilangnya warna biru. *Freeze drying* dapat menghindari degradasi termal dan memastikan retensi warna biru bahkan retensi bioaktivitas maksimum setelah pengeringan (Kandasamy & Naveen, 2022).

Freeze drying dinilai ideal untuk teknologi peningkatan stabilitas PC karena membentuk matriks kaku seperti dari golongan polisakarida akibat proses pembekuan membantu pembentukan struktur pori yang kuat. Studi yang dilakukan Lemos et al. (2020), PC dienkapsulasi dalam pati hasil modifikasi ikatan silang dipadukan dengan *freeze drying*. Proses ini membantu pati membentuk matriks hidrogel yang kaku di sekitar PC. Matriks ini berfungsi sebagai barier fisik yang memperlambat pelepasan PC dalam aplikasi farmasi. Sedangkan studi Pan utai et al. (2020) memadukan penggunaan agen penstabil maltodekstrin dan gum arab dengan *freeze drying* dan menghasilkan bubuk yang memiliki efisiensi enkapsulasi yang sangat tinggi yakni 99%, yang menunjukkan bahwa PC secara efektif terperangkap dalam matriks polisakarida tanpa penurunan konsentrasi secara signifikan selama proses.

Freeze drying juga dilaporkan menghasilkan serbuk dengan sifat fisik yang sangat baik untuk penyimpanan yang secara tidak langsung berkontribusi pada stabilitas. Proses ini menghasilkan bubuk dengan kadar air dan aktivitas air yang sangat rendah (Pan utai et al.

2020). Aktivitas air yang rendah dapat menghambat reaksi kimia seperti reaksi oksidasi dan pertumbuhan mikroba yang dapat mendegradasi PC selama penyimpanan. Selain itu *freeze drying* cenderung menghasilkan bubuk dengan struktur berpori, yang jika dilarutkan kembali dalam air, akan menunjukkan kelarutan yang tinggi. Hal ini merupakan kualitas produk yang diinginkan untuk aplikasi minuman. Meski demikian penggunaan *freeze drying* secara tunggal tanpa penambahan agen penstabil tidak secara otomatis menjamin perlindungan PC terhadap kondisi asam dan efektivitasnya pada pH rendah memerlukan verifikasi lanjutan.

Teknologi pengeringan suhu tinggi (*Spray drying*)

Studi kriteria inklusi pada penelitian ini yang membahas peran teknologi pengeringan suhu tinggi terhadap stabilitas fikosianin (PC) adalah studi yang dilakukan oleh Ilter et al. (2021). Fokus utama penggunaan metode *spray drying* dalam pemrosesan fikosianin (PC) adalah efisiensi mikroenkapsulasi. Metode ini dinilai cepat, berkelanjutan dan ekonomis menjadikannya pilihan utama untuk memproduksi PC dalam jumlah besar sebagai bahan tambahan pangan. Mekanisme metode *spray drying* pada pengeringan PC adalah, larutan PC dan agen penstabil disemprotkan ke dalam ruang pengeringan panas, lalu air diuapkan dengan sangat cepat, membentuk partikel serbuk padat. Meskipun cepat, *spray drying* memiliki kelemahan karena melibatkan paparan suhu tinggi yakni 150-180°C di *inlet temperature* sedangkan PC sangat sensitif terhadap panas. Paparan suhu tinggi dapat menyebabkan denaturasi termal pada protein dan kromofor dalam struktur PC, yang mengakibatkan hilangnya warna biru. Adapun penelitian yang melibatkan metode *spray drying* berfokus pada pemilihan bahan dinding yang mampu melindungi PC secara efektif selama paparan panas yang singkat tersebut. Studi Ilter et al. (2021) berfokus pada perbandingan berbagai bahan dinding berupa maltodekstrin, gum arab, *Whey Protein Isolate* (WPI) dan sodium caseinate untuk mendapatkan kombinasi yang optimal. Kombinasi gum arab-WPI menunjukkan efisiensi mikroenkapsulasi tertinggi yakni sebesar 91.19%. WPI bertindak sebagai surfaktan yang baik dengan mengurangi tegangan permukaan dan membantu pembentukan emulsi yang stabil sebelum proses pengeringan. Sedangkan kombinasi gum arab dan WPI bersama-sama menciptakan lapisan pelindung yang kompak yang segera mengeras di permukaan tetesan selama pengeringan, yang secara fisik menjebak PC di inti partikel dan melindunginya dari suhu tinggi. Namun, data dari studi tersebut menunjukkan bahwa teknologi ini belum tervalidasi mengatasi stabilitas PC di lingkungan asam.

Teknologi non-termal (*High-Pressure Processing*)

Temuan utama mengenai teknologi non-termal menggunakan metode *high-pressure processing* (HPP) diperoleh dari penelitian Prasetyaningrum et al. (2024), Zhang et al. (2021), Zhang, Li, dan Abbaspourrad (2020). HPP adalah metode sterilisasi dan preservasi menggunakan tekanan hidrostatik tinggi (100 – 1000 Mpa) untuk menonaktifkan mikroorganisme dan enzim, sambil mempertahankan kualitas bahan yang sensitif terhadap panas (Kandasamy & Naveen, 2022). Keuntungan metode ini untuk pemrosesan fikosianin (PC) adalah PC bersifat sangat sensitif terhadap panas dan HPP memungkinkan pasteurisasi dingin tanpa menurunkan warna biru PC akibat denaturasi termal. Penelitian Zhang et al. (2020) mengaplikasikan HPP pada kompleks PC-*Whey Protein Isolate* (WPI) dan PC-karagenan pada tekanan 450 Mpa dan 600 Mpa. Studi tersebut melaporkan bahwa pada

tekanan tersebut stabilitas cahaya (fotostabilitas) PC meningkat secara signifikan di pH 3.00 untuk kompleks PC-WPI dan 7.00 untuk kompleks PC-karagenan. Menurut Zhang et al. (2020) tekanan tinggi tidak hanya berperan membunuh mikroba, tetapi juga secara fisik dan kimia memodifikasi molekul protein atau polisakarida yang berinteraksi dengan PC. HPP menyebabkan WPI dan karagenan mengalami konformasi akan tetapi perubahan ini tidak merusak kromofor PC, melainkan menyebabkan WPI dan karagenan melipat di sekitar PC. Studi juga menyatakan bahwa struktur baru tersebut lebih kompak dan menciptakan lapisan pelindung yang rapat di sekitar kromofor PC. Lapisan ini berfungsi sebagai barier fisik yang lebih efektif melindungi PC dari radikal pengoksidasi yang dihasilkan oleh paparan cahaya. Studi juga melaporkan bahwa efek HPP terhadap PC bergantung pada pH larutan. Stabilitas PC dan kompleksnya (PC-WPI dan PC-karagenan) sangat stabil pada perlakuan HPP di kondisi pH 3.0. Sedangkan di pH 5.0 PC dan kompleksnya lebih tidak stabil pada perlakuan HPP, yang ditunjukkan kehilangan retensi warna biru sebesar 10%-30%. HPP menyebabkan agregasi protein yang lebih besar pada PC-WPI di pH 5.0 yang menunjukkan bahwa HPP dapat merusak PC jika digunakan pada pH yang salah.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa stabilisasi PC terhadap faktor pemicu degradasi seperti asam, panas dan cahaya memerlukan strategi penggabungan agen kimia dan teknologi pemrosesan. Agen berbasis polisakarida anionik khususnya karagenan terbukti paling unggul dalam mengatasi kondisi pH rendah karena kompleksasi elektrostatis yang kuat. Sedangkan ditinjau dari teknologi pemrosesan, spray drying dengan agen penstabil berupa gum arab dan *Whey Isolate Protein* (WPI) lebih efisien menghasilkan serbuk dengan efisiensi enkapsulasi yang tinggi. Meski demikian, keterbatasan utama dalam penelitian studi literatur ini adalah minimnya data perbandingan yang seragam untuk dapat membuktikan agen penstabil terbaik untuk aplikasi produk pH rendah. Adapun berdasarkan kesimpulan ini arah riset berikutnya dapat berfokus pada validasi dan perbandingan secara eksperimental antara agen penstabil karagenan, gum arab dan WPI di bawah kondisi asam yang sama seiring dengan pemanfaatan teknologi *freeze drying*, *spray drying*, dan (*High-Pressure Processing*) HPP untuk mencapai stabilitas PC yang diinginkan.

KETERBATASAN

Belum ditemukan penelitian tunggal yang secara langsung dan seragam membandingkan kinerja agen stabilisasi terbaik terhadap faktor pemicu degradasi asam. Sebagian besar penelitian yang berfokus pada teknologi pemrosesan cenderung menguji efisiensi enkapsulasi dan stabilitas termal, tetapi tidak menyertakan pengujian stabilitas yang memadai terhadap kondisi pH rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Campos Assumpção de Amarante, M., Cavalcante Braga, A. R., Sala, L., & Juliano Kalil, S. (2020). Colour stability and antioxidant activity of C-phycoerythrin-added ice creams after *in vitro* digestion. *Food Research International*, 137(July), 109602. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109602>
- Falkeborg, M. F., Roda-Serrat, M. C., Burnæs, K. L., & Nielsen, A. L. D. (2018). Stabilising phycoerythrin by anionic micelles. *Food Chemistry*, 239, 771–780.

- <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.007>
- Goyudianto, B. A., Meliana, C., Meliana, C., Muliani, D., J. J., Sadeli, Y. E., & Ratnasari, N. R. P. (2021). Stability of Phycocyanin, Phycoerythrin, and Astaxanthin from Algae Towards Temperature, pH, Light, and Oxygen as a Commercial Natural Food Colorant. *Indonesian Journal of Life Sciences*, 03(02), 28–42. <https://doi.org/10.54250/ijls.v3i2.126>
- Herawati, H. (2018). Potensi Hidrokoloid Sebagai Bahan Tambahan Pada Produk Pangan Dan Nonpangan Bermutu. *Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Pertanian*, 37(1), 17. <https://doi.org/10.21082/jp3.v37n1.2018.p17-25>
- İlter, I., Koç, M., Demirel, Z., Conk Dalay, M., & Kaymak Ertekin, F. (2021). Improving the stability of phycocyanin by spray dried microencapsulation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(7), 0–2. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15646>
- Kandasamy, S., & Naveen, R. (2022). A review on the encapsulation of bioactive components using spray-drying and freeze-drying techniques. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8), 1–14. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14059>
- Lemos, P. V. F., Opretzka, L. C. F., Almeida, L. S., Cardoso, L. G., Silva, J. B. A. da, Souza, C. O. de, Villarreal, C. F., & Druzian, J. I. (2020). Preparation and characterization of C-phycocyanin coated with STMP/STPP cross-linked starches from different botanical sources. *International Journal of Biological Macromolecules*, 159, 739–750. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.111>
- Li, Y., Zhang, Z., & Abbaspourrad, A. (2021). Improved thermal stability of phycocyanin under acidic conditions by forming soluble complexes with polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106852>
- Molopa, S. T. (2024). Artificial intelligence-based literature review adaptation. *South African Journal of Library and Information Science*, 90(Ifla 2022), 1–18. <https://doi.org/10.7553/90-1-2390>
- Morya, S., Kumar Chattu, V., Khalid, W., Zubair Khalid, M., & Siddeeg, A. (2023). Potential protein phycocyanin: an overview on its properties, extraction, and utilization. *International Journal of Food Properties*, 26(2), 3160–3176. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2271686>
- Munawaroh, H. S. H., Gumilar, G. G., Alifia, C. R., Marthania, M., Stellasary, B., Yuliani, G., Wulandari, A. P., Kurniawan, I., Hidayat, R., Ningrum, A., Koyande, A. K., & Show, P. L. (2020). Photostabilization of phycocyanin from *Spirulina platensis* modified by formaldehyde. *Process Biochemistry*, 94(April), 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.04.021>
- Newsome, A. G., Culver, C. A., & Van Breemen, R. B. (2014). Nature's palette: The search for natural blue colorants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(28), 6498–6511. <https://doi.org/10.1021/jf501419q>
- Nowruzi, B., Konur, O., & Anvar, S. A. A. (2022). The Stability of the Phycobiliproteins in the Adverse Environmental Conditions Relevant to the Food Storage. *Food and Bioprocess Technology*, 15(12), 2646–2663. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02855-8>
- Pan-utai, W., & Iamtham, S. (2020). Enhanced microencapsulation of C-phycocyanin from *Arthrospira* by freeze-drying with different wall materials. *Food Technology and Biotechnology*, 58(4), 423–432. <https://doi.org/10.17113/ftb.58.04.20.6622>

- Pez Jaeschke, D., Rocha Teixeira, I., Damasceno Ferreira Marczak, L., & Domeneghini Mercali, G. (2021). Phycocyanin from *Spirulina*: A review of extraction methods and stability. *Food Research International*, 143(March). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110314>
- Pradeep, H. N., & Nayak, C. A. (2019). Enhanced stability of C-phycocyanin colorant by extrusion encapsulation. *Journal of Food Science and Technology*, 56(10), 4526–4534. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03955-8>
- Prasetyaningrum, A., Nur Jannah, H., Wheni Indrianingsih, A., & Dwi Anggoro, D. (2024). Phycocyanin Encapsulation in Carboxymethyl Chitosan and Whey Protein Isolate as a Strategy to Enhance Physicochemical Stability as a Food Coloring: A Review. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 25(19), 656–668. <https://doi.org/10.62877/75-ijcbs-24-25-19-75>
- Stovold, E., Beecher, D., Foxlee, R., & Noel-Storr, A. (2014). Study flow diagrams in Cochrane systematic review updates: An adapted PRISMA flow diagram. *Systematic Reviews*, 3(1), 1–5. <https://doi.org/10.1186/2046-4053-3-54>
- Wu, M., Zhou, Y., & Tang, R. C. (2023). Bridging phycocyanin onto silk by genipin towards durable colouristic, antioxidant and UV protective properties: A sustainable strategy for fully bio-based textile. *Chemical Engineering Journal*, 477. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146808>
- Xu, W., Xiao, Y., Luo, P., & Fan, L. (2018). Preparation and characterization of C-phycocyanin peptide grafted N-succinyl chitosan by enzyme method. *International Journal of Biological Macromolecules*, 113(2017), 841–848. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.076>
- Zhang, S., Zhang, Z., Dadmohammadi, Y., Li, Y., Jaiswal, A., & Abbaspourrad, A. (2021). Whey protein improves the stability of C-phycocyanin in acidified conditions during light storage. *Food Chemistry*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128642>
- Zhang, Z., Cho, S., Dadmohammadi, Y., Li, Y., & Abbaspourrad, A. (2021). Improvement of the storage stability of C-phycocyanin in beverages by high-pressure processing. *Food Hydrocolloids*, 110, 106055. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106055>
- Zhang, Z., Li, Y., & Abbaspourrad, A. (2020). Improvement of the colloidal stability of phycocyanin in acidified conditions using whey protein-phycocyanin interactions. *Food Hydrocolloids*, 105(November 2019), 105747. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105747>