BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi mendorong penerapan prinsip keberlanjutan dalam berbagai bidang, termasuk kimia analitik dan ilmu forensik. Salah satu upaya yang dilakukan adalah mengurangi penggunaan bahan kimia sintetis yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan melalui pemanfaatan bahan yang lebih ramah lingkungan. Pendekatan ini dikenal sebagai *green chemistry* dan telah berkembang menjadi konsep *green forensic science* yang menekankan penggunaan material, metode, dan reagen yang lebih aman serta berkelanjutan dalam kegiatan analisis forensik. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi penggunaan bahan berbahaya yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan maupun kesehatan analis forensik. Oleh karena itu, berbagai penelitian mulai mengembangkan pemanfaatan biomaterial dan senyawa alami sebagai alternatif bahan analisis yang lebih aman dan berkelanjutan untuk mendukung aplikasi forensik modern (Unal, dkk., 2024).

Metode pengembangan sidik jari laten yang telah lama digunakan, seperti ninhidrin, serbuk logam, atau *cyanoacrylate fuming*, terbukti efektif. Namun, metode tersebut memiliki sejumlah keterbatasan. Ninhidrin dapat bereaksi dengan asam amino dalam sidik jari, menghasilkan warna ungu, tetapi reaksi ini juga bersifat destruktif sehingga berpotensi merusak sampel dan menghambat analisis lanjutan menggunakan teknik forensik lain (Houck & Siegel, 2022). Serbuk logam relatif mahal serta dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan benar. Sementara itu, penggunaan *cyanoacrylate* menimbulkan efek toksik melalui uap yang dihasilkan, sehingga berisiko mengganggu kesehatan petugas forensik serta membutuhkan fasilitas laboratorium dengan ventilasi khusus (Santos, dkk., 2020). Hal ini menegaskan perlunya inovasi metode pengembangan sidik jari laten yang lebih aman, murah, dan ramah lingkungan.

Pewarna merupakan salah satu komponen penting dalam berbagai aplikasi analitik karena berfungsi meningkatkan visibilitas dan mempermudah proses identifikasi suatu objek atau analit yang diamati (Alegbe & Uthman, 2024). Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian terhadap penggunaan pewarna alami semakin meningkat sebagai respons terhadap dampak lingkungan dan kesehatan yang ditimbulkan oleh penggunaan pewarna sintetis. Pewarna alami dinilai lebih ramah lingkungan, mudah terdegradasi secara biologis, serta berasal dari sumber daya terbarukan sehingga mendukung prinsip keberlanjutan dalam berbagai bidang aplikasi ilmiah dan industri (Patel, dkk., 2024). Selain itu, perkembangan teknologi analitik modern mendorong pemanfaatan bahan alami sebagai alternatif yang lebih aman dan berkelanjutan dibandingkan bahan sintetis konvensional (Alegbe & Uthman, 2024).

Salah satu pigmen alami yang berpotensi dikembangkan dalam aplikasi analitik adalah antosianin. Antosianin merupakan kelompok senyawa flavonoid yang bertanggung jawab terhadap warna merah, ungu, hingga biru pada berbagai jenis tumbuhan. Selain memiliki warna yang menarik, antosianin juga bersifat ramah lingkungan, biokompatibel, dan mampu memberikan respons warna terhadap perubahan kondisi lingkungan seperti pH. Karakteristik tersebut menyebabkan antosianin banyak diteliti sebagai pewarna alami, indikator kolorimetri, sensor kimia, dan berbagai aplikasi berbasis konsep kimia hijau *(green chemistry*) (Wardani, dkk., 2024).

Pemanfaatan bahan alam sebagai sumber senyawa bioaktif semakin berkembang dalam bidang kimia analitik, termasuk dalam rumpun analitik forensik. Salah satu kelompok senyawa yang banyak diteliti adalah antosianin, yaitu pigmen alami yang memberikan warna merah, ungu, hingga biru pada berbagai jenis tanaman. Antosianin memiliki karakteristik yang unik, bersifat larut air, dan sangat responsif terhadap perubahan lingkungan sehingga menarik untuk dikaji baik secara kimia maupun aplikasinya dalam analitik forensik (Giusti & Wrolstad, 2001). Pemanfaatan kulit buah naga mendukung konsep *waste to value*. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS, 2022), produksi buah naga di Indonesia mencapai lebih dari 500.000 ton per tahun, dengan proporsi kulit mencapai sekitar 30-35% dari total berat buah. Artinya, limbah kulit buah naga yang dihasilkan mencapai 175.000

ton setiap tahunnya. Jumlah ini menunjukkan potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber pigmen alami bernilai tambah, alih-alih dibuang sebagai limbah organik.

Buah naga merah (*Hylocereus sp.*) merupakan salah satu tanaman tropis yang memiliki kandungan antosianin cukup tinggi, tidak hanya pada daging buahnya tetapi terutama pada bagian kulitnya. Kulit buah naga seringkali dibuang sebagai limbah padahal mengandung pigmen antosianin dalam jumlah signifikan sehingga berpotensi menjadi sumber alternatif pigmen alami yang bernilai ekonomi dan ilmiah (Sudarmi, dkk., 2015). Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa ekstraksi kulit buah naga dapat menghasilkan warna merah keunguan yang stabil dalam kondisi asam dan dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi kimia (Widyasanti, dkk., 2022). Kulit buah naga mengandung berbagai jenis antosianin, di antaranya *cyanidin-3-glucoside*, *delphinidin*, dan *pelargonidin*, serta pigmen betalain seperti betasianin, yang memberikan warna merah ungu yang khas (Khoo, dkk., 2024 ; Nugraha, dkk., 2023). Pigmen ini menarik karena mampu berinteraksi dengan komponen residu sidik jari laten, seperti asam amino, lipid, dan garam. Struktur antosianin yang bersifat polar serta memiliki gugus hidroksil memungkinkan terbentuknya ikatan hidrogen atau interaksi elektrostatik dengan residu tersebut, sehingga mendukung visualisasi pola sidik jari.

Kulit buah naga merah (*Hylocereus sp.*) merupakan produk samping agroindustri yang jumlahnya besar dan kaya pigmen, sehingga berpotensi kuat sebagai sumber pewarna alami bernilai tambah. Konsumsi atau pengolahan buah naga dapat menghasilkan sekitar ± 30% *co-product* yang didominasi bagian kulit, dan kulit tersebut mengandung senyawa bernilai seperti pigmen (terutama betasianin/betalain), fenolik, serta serat, sehingga relevan untuk konsep *waste-to-value* (Oliveira, dkk., 2025). Tinjauan ilmiah terbaru juga menegaskan bahwa pada buah naga, pigmen antosianin dan betalain ditemukan pada bagian buah termasuk di bagian kulit, serta terkait dengan aktivitas antioksidanan, sehingga mendukung pemanfaatannya sebagai kandidat pewarna alami yang fungsional. Namun, pigmen dari kulit buah naga dilaporkan cenderung tidak stabil terhadap kondisi lingkungan tertentu, sehingga penelitian modern banyak mengarahkan pada strategi ekstraksi hijau dan stabilisasi agar warna lebih tahan dalam aplikasi (Sampaio, dkk., 2025).

Dalam bidang analitik forensik, pigmen alami memiliki potensi sebagai bahan pewarna atau komponen reagen, misalnya dalam pewarnaan sidik jari laten, penandaan jejak, ataupun analisis komponen pada dokumen dan serat. Bahan alam seperti kulit buah naga dapat digunakan sebagai serbuk pengembang sidik jari *(dusting powder)*, membuktikan bahwa pigmen tanaman memiliki relevansi langsung dalam forensik, terutama sebagai alternatif yang lebih aman, ramah lingkungan, dan ekonomis dibandingkan bahan kimia sintetis (Sari & Lubis, 2021). Hal ini memperkuat urgensi penelitian pigmen antosianin dari kulit buah naga sebagai kandidat pewarna dalam aplikasi analitik forensik, meskipun penelitian ini tidak memfokuskan pada visualisasi sidik jari.

Dari sisi teknologi, penelitian pada serbuk kulit buah naga menunjukkan adanya potensi pewarnaan dan kestabilan pada rentang pH tertentu, sehingga kulit buah naga dapat diposisikan sebagai sumber pigmen alami alternatif untuk menggantikan pewarna sintetis pada berbagai matriks. Pendekatan ekstraksi hijau lain seperti kombinasi ultrasonik dan enzim juga dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi pemulihan senyawa bioaktif termasuk pigmen dari kulit buah naga, memperkuat bahwa limbah kulitnya layak dikembangkan sebagai sumber pigmen alami bernilai (Oliveira, dkk., 2025). Studi proses terbaru menunjukkan bahwa *ultrasound-assisted extraction* (UAE) dari kulit buah naga dapat menghasilkan ekstrak kaya bioaktif, dan enkapsulasi dapat membantu meningkatkan performa dan ketahanan bioaktif dibandingkan ekstrak tanpa enkapsulasi, yang relevan untuk kebutuhan kestabilan pewarna (Sampaio, dkk., 2025).

Karakterisasi pigmen antosianin sangat penting dilakukan untuk mengetahui kelayakan pigmen sebagai kandidat reagen pewarna. Analisis menggunakan spektrofotometri UV-Vis memberikan informasi mengenai panjang gelombang maksimum *(λ_{max})* dan intensitas warna sehingga dapat digunakan untuk menilai potensi pigmen sebagai pewarna analitik (Lauria & Silva, 2024). Selain itu, metode pH diferensial banyak digunakan untuk menentukan total kandungan antosianin *(Total Anthocyanin Content/TAC)* secara akurat karena sensitif terhadap perubahan struktur antosianin pada pH yang berbeda (Giusti & Wrolstad, 2001).

Stabilitas pigmen juga menjadi aspek penting dalam analisis forensik. Pigmen yang tidak stabil pada pH tertentu, suhu tinggi, atau paparan cahaya akan

mengalami degradasi warna sehingga kurang layak digunakan sebagai pewarna analitik. Oleh karena itu, penelitian mengenai stabilitas antosianin terhadap variasi pH, suhu, dan cahaya dapat menentukan apakah pigmen dari kulit buah naga dapat bertahan dalam kondisi lingkungan yang sering dihadapi pada analisis bukti forensik (Sunarya, dkk., 2024). Kajian terbaru juga menegaskan bahwa perubahan struktur dan warna antosianin akibat faktor lingkungan merupakan isu sentral sehingga pengukuran parameter seperti serapan UV-Vis dan pendekatan stabilisasi menjadi penting sebelum aplikasi praktis (Feitosa, dkk., 2025)

Sejumlah penelitian telah mengusulkan pemanfaatan bahan alami sebagai alternatif visualisasi sidik jari laten. Sari dan lubis 2021 mengembangkan metode serbuk kulit buah naga (*Hylocereus sp.*) untuk menampilkan pola sidik jari. Hasilnya menunjukkan bahwa pola sidik jari dapat teridentifikasi dengan baik pada permukaan non-pori, meskipun masih terbatas pada media tertentu. Hal ini membuka peluang untuk eksplorasi lebih lanjut terhadap berbagai bahan nabati lain yang mudah diperoleh. Dengan demikian, karakterisasi seperti penentuan λ_{max}, kuantifikasi pigmen, serta uji stabilitas terhadap pH, suhu, cahaya menjadi langkah krusial untuk menutup gap antara potensi bahan alami dan kesiapan sebagai pewarna dan reagen analitik yang konsisten (Elshamey, dkk., 2025).

Berdasarkan uraian tersebut, karakterisasi pigmen antosianin dari kulit buah naga merah sangat penting dilakukan untuk menilai potensi penggunaannya sebagai kandidat pewarna dalam aplikasi analitik forensik. Penelitian ini tidak berhenti pada tahap ekstraksi pigmen, melainkan difokuskan pada karakterisasi terarah untuk menilai kelayakan pigmen sebagai kandidat pewarna dalam kebutuhan analitik forensik, yakni melalui penentuan profil serapan (UV-Vis) dan evaluasi kestabilan pada parameter kunci pH dan suhu yang paling menentukan perubahan warna serta degradasi pigmen. Fokus pada pH dan suhu menjadi penting karena bukti forensik sering harus disimpan dan dipertahankan integritasnya, dan pedoman preservasi barang bukti menekankan bahwa kontrol kondisi penyimpanan terutama suhu berpengaruh terhadap stabilitas sampel selama penanganan dan penyimpanan. Dengan demikian, karakterisasi terarah ini menutup gap antara pigmen berhasil diekstraksi dan pigmen layak dipakai secara konsisten, karena data stabilitas pH

suhu diperlukan agar performa warna tetap andal pada kondisi yang relevan dengan penyimpanan/penanganan barang bukti.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, dapat diidentifikasi sejumlah permasalahan yang saling berkaitan dalam konteks pemanfaatan limbah kulit buah naga merah (*Hylocereus sp.*) sebagai sumber pigmen antosianin alami untuk pengembangan pewarna yang lebih aman dan ramah lingkungan di bidang forensik. Adapun identifikasi masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1) Pemanfaatan limbah kulit buah naga merah (*Hylocereus sp*) sebagai sumber pewarna alami masih belum optimal, padahal kulit buah naga mengandung pigmen antosianin dan senyawa bioaktif yang berpotensi dimanfaatkan dalam bidang forensik.
2) Penggunaan pewarna atau reagen sintetis pada visualisasi sidik jari laten masih memiliki kelemahan terkait aspek toksisitas, keselamatan kerja, serta dampak lingkungan sehingga diperlukan alternatif pewarna yang lebih aman dan ramah lingkungan.
3) Data mengenai stabilitas pigmen antosianin dari kulit buah naga merah, khususnya terhadap pengaruh pH, suhu, cahaya, dan waktu penyimpanan yang relevan dengan kondisi barang bukti forensik, masih terbatas.
4) Belum banyak penelitian yang mengkaji karakterisasi pigmen antosianin kulit buah naga merah sebagai kandidat pewarna alami untuk aplikasi analitik/forensik.

1.3 Ruang Lingkup

Agar penelitian ini lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan yang telah ditetapkan, maka ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada:

1) Penelitian difokuskan pada pemanfaatan limbah kulit buah naga merah (*Hylocereus sp.*) sebagai sumber pigmen antosianin alami.
2) Penelitian meliputi ekstraksi dan karakterisasi pigmen antosianin kulit buah naga merah menggunakan analisis UV-Vis.
3) Karakterisasi yang dilakukan mencakup penentuan panjang gelombang

maksimum (λ_{max}) dan pengujian stabilitas antosianin terhadap variasi pH, suhu, cahaya, serta waktu penyimpanan.

4) Pengujian stabilitas dilakukan untuk mensimulasikan ketahanan pigmen pada kondisi yang berpotensi ditemui dalam penyimpanan barang bukti forensik.
5) Penelitian ini tidak membahas identifikasi struktur senyawa secara mendalam maupun uji toksisitas biologis dari ekstrak yang diperoleh.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka rumusan masalah penelitian ini adalah:

1) Bagaimana proses ekstraksi yang efektif untuk memperoleh pigmen antosianin dari kulit buah naga merah (*Hylocereus sp.*) menggunakan pelarut etanol 70% yang diasamkan?
2) Berapa nilai panjang gelombang maksimum (λ_{max}) dan berapa total kandungan antosianin (*Total Anthocyanin Content/TAC*) dari ekstrak kulit buah naga merah berdasarkan analisis spektrofotometri UV-Vis dengan metode pH diferensial?
3) Bagaimana stabilitas pigmen antosianin dari kulit buah naga merah terhadap variasi pH, suhu, dan paparan cahaya seperti yang dibutuhkan untuk aplikasi analitik forensik?

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan penelitian, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1) Penelitian ini dibatasi pada ekstraksi pigmen dari kulit buah naga merah (*Hylocereus sp.*) menggunakan metode maserasi dengan pelarut etanol 70% yang diasamkan (HCl 0,1%).
2) Penelitian ini dibatasi pada karakterisasi spektrum pigmen menggunakan spektrofotometri UV-Vis, meliputi pemindaian spektrum pada rentang 350-700 nm untuk menentukan panjang gelombang maksimum (λ_{max}).
3) Penelitian ini dibatasi pada uji stabilitas pigmen terhadap pH tertentu (pH

1, 5, dan 7) dan suhu (4°C dan 25°C) dalam periode penyimpanan 0–72 jam, sebagai simulasi kondisi yang relevan untuk kebutuhan analitik forensik.

4) Penelitian ini tidak mencakup uji aplikasi langsung pada barang bukti atau sidik jari laten, tidak melakukan identifikasi struktur menggunakan instrumen lanjutan (misalnya FTIR/LC–MS), serta tidak melakukan uji toksisitas biologis ekstrak.

1.6 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk :

1) Menentukan metode ekstraksi yang efektif dalam memperoleh pigmen antosianin dari kulit buah naga merah dengan menggunakan pelarut etanol 70% yang diasamkan.
2) Menentukan panjang gelombang maksimum (λ_{max}) dan menghitung total kandungan antosianin (TAC) dari ekstrak kulit buah naga merah menggunakan spektrofotometri UV-Vis dengan metode pH diferensial.
3) Menganalisis stabilitas pigmen antosianin terhadap variasi pH, suhu, dan paparan cahaya guna mengevaluasi potensi pigmen sebagai kandidat pewarna yang sesuai untuk aplikasi analitik forensik.

1.7 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik secara teoritis maupun praktis, yaitu:

1) Manfaat Teoritis (Akademis) :
   a. Memberikan kontribusi ilmiah mengenai karakterisasi pigmen antosianin dari kulit buah naga merah. Penelitian ini memperluas pengetahuan tentang profil spektra, λ_{max}, kandungan antosianin, dan stabilitas pigmen sebagai dasar kajian kimia analitik dan pigmen alami.
   b. Memperkuat penerapan prinsip *Green Forensic Science* melalui kajian bahan alami berbasis limbah (*waste-to-value*), sehingga memperkaya literatur mengenai alternatif reagen/pewarna yang lebih aman dan berkelanjutan.

c. Memberikan dasar teoretis bagi pengembangan bahan pewarna untuk keperluan analitik forensik. Karakterisasi pigmen alami dari buah naga dapat menjadi rujukan bagi penelitian selanjutnya terkait pengembangan reagen atau pewarna yang berbasis bahan alami dalam forensik.

2) Manfaat Praktis

a. Memberikan informasi mengenai efektivitas ekstraksi pigmen antosianin dari kulit buah naga merah. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai panduan dalam penyiapan pigmen alami yang ramah lingkungan dan ekonomis.

b. Menawarkan alternatif pewarna yang berpotensi digunakan dalam analitik forensik. Pigmen yang stabil dan memiliki karakter warna yang baik dapat menjadi kandidat bahan pewarna untuk aplikasi seperti analisis dokumen, pewarnaan komponen jejak, atau pengembangan reagen forensik.

c. Memberikan dasar data untuk penelitian lanjutan. Data λ_{max}, TAC, dan stabilitas antosianin dapat menjadi acuan untuk pengembangan metode lebih lanjut, baik untuk penelitian terapan, inovasi reagen, atau skala industri.

THE Character Building UNIVERSITY