ISSN: 2598-8565 (media cetak)
ISSN: 2620-4339 (media online)

ANALISIS FITUR CITRA DIGITAL PADA MEMBRAN SELULOSA BAKTERI–KITOSAN DENGAN VARIASI KONSENTRASI CENTELLA ASIATICA

Claudia Shinta Octa Wibowo✉, Czidni Sika Azkia, Ayu Puspa Wirani
Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Serang, Indonesia
Email: claudia.shinta@untirta.ac.id

DOI: https://doi.org/10.46880/jmika.Vol10No2.pp752-762

ABSTRACT

Digital image analysis provides a simple, non-destructive approach for quantifying the visual characteristics of biomaterial membrane surfaces. This study evaluated bacterial cellulose–chitosan membranes impregnated with Centella asiatica extract at concentrations of 0%, 1%, 2%, and 3%, while maintaining a constant chitosan concentration. One full-resolution macroscopic image of each membrane was divided into ten non-overlapping regions of interest (ROIs), yielding a total of 40 ROI observations. Image processing was performed using Python to extract four color and intensity features, namely mean red, mean green, mean blue, and mean grayscale intensity, along with three texture features: contrast, homogeneity, and entropy. The analysis was conducted using a descriptive and exploratory approach, as each concentration was represented by only one membrane. The membrane containing 1% Centella asiatica extract exhibited the lowest mean grayscale intensity and the highest homogeneity, whereas the 2% membrane showed the highest mean grayscale intensity and the lowest homogeneity. The highest contrast value was observed in the 0% membrane, while the 2% and 3% membranes exhibited higher entropy values than the 0% and 1% membranes. These findings indicate that color and texture features provide complementary information for objectively characterizing visual differences and local heterogeneity among membrane formulations.

Keywords: Digital Image Analysis, Bacterial Cellulose, Chitosan, Centella Asiatica, Texture Features.

ABSTRAK

Analisis citra digital menyediakan pendekatan sederhana dan non-destruktif untuk mengkuantifikasi karakteristik visual permukaan membran biomaterial. Penelitian ini mengevaluasi membran selulosa bakteri–kitosan yang diimpregnasi ekstrak Centella asiatica dengan konsentrasi 0%, 1%, 2%, dan 3%, sementara konsentrasi kitosan dipertahankan tetap. Satu citra makroskopis resolusi penuh dari setiap membran dibagi menjadi sepuluh region of interest (ROI), sehingga diperoleh total 40 observasi ROI. Pengolahan citra menggunakan Python dilakukan untuk mengekstraksi empat fitur warna dan intensitas, yaitu mean red, mean green, mean blue, dan mean grayscale intensity, serta tiga fitur tekstur berupa contrast, homogeneity, dan entropy. Analisis dilakukan secara deskriptif dan eksploratif karena setiap konsentrasi hanya diwakili oleh satu membran. Membran 1% menunjukkan mean grayscale intensity terendah dan homogeneity tertinggi, sedangkan membran 2% memiliki mean grayscale intensity tertinggi dan homogeneity terendah. Nilai contrast tertinggi diperoleh pada membran 0%, sedangkan entropy pada membran 2% dan 3% lebih tinggi dibandingkan membran 0% dan 1%. Hasil ini menunjukkan bahwa fitur warna dan tekstur memberikan informasi yang saling melengkapi dalam mendeskripsikan perbedaan visual dan heterogenitas lokal antarformulasi secara objektif.

Kata Kunci: Analisis Citra Digital, Selulosa Bakteri, Kitosan, Centella Asiatica, Fitur Tekstur.

PENDAHULUAN

Selulosa bakteri merupakan biopolimer yang diproduksi oleh mikroorganisme tertentu dalam bentuk jaringan fibril selulosa berukuran nano. Dibandingkan selulosa tumbuhan, selulosa bakteri memiliki tingkat kemurnian tinggi karena tidak mengandung lignin maupun hemiselulosa, serta memiliki kemampuan retensi air, fleksibilitas, dan biokompatibilitas yang baik. Karakteristik tersebut menjadikannya menarik sebagai matriks pembalut luka yang mampu mempertahankan lingkungan lembap dan mendukung proses penyembuhan (Horue et al., 2023; Hou et al., 2024).

Meskipun demikian, selulosa bakteri murni belum menyediakan seluruh fungsi biologis yang diharapkan pada wound dressing, khususnya aktivitas antimikroba. Modifikasi dengan kitosan menjadi salah satu pendekatan karena kitosan bersifat biodegradable, biokompatibel, dan memiliki aktivitas antibakteri. Penggabungan kitosan dengan selulosa bakteri

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

memungkinkan pembentukan material komposit yang mempertahankan jaringan selulosa sekaligus memperoleh fungsi tambahan dari kitosan (Bagheri et al., 2022; Dechojarassri et al., 2023).

Selain polimer, komponen bioaktif berbasis bahan alam dapat ditambahkan untuk memperluas fungsi membran. *Centella asiatica* mengandung triterpenoid seperti asiaticoside, madecassoside, asiatic acid, dan madecassic acid yang telah dikaitkan dengan stimulasi sintesis kolagen, modulasi inflamasi, aktivitas antioksidan, dan regenerasi jaringan (Bandopadhyay et al., 2023; Witkowska et al., 2024). Kombinasi selulosa bakteri, kitosan, dan ekstrak *Centella asiatica* dengan demikian berpotensi menghasilkan membran komposit dengan karakteristik fisik dan fungsional yang beragam.

Variasi konsentrasi ekstrak *Centella asiatica* tidak hanya dapat memengaruhi komposisi material, tetapi juga tampilan makroskopis seperti warna, transparansi, keseragaman, dan tekstur permukaan setelah impregnasi dan pengeringan. Namun, evaluasi visual langsung bersifat subjektif sehingga diperlukan metode kuantitatif yang dapat mengubah tampilan tersebut menjadi parameter numerik.

Analisis citra digital menyediakan kerangka yang sesuai untuk tujuan tersebut. Fitur warna dapat direpresentasikan melalui kanal red, green, dan blue (RGB) serta intensitas grayscale, sedangkan tekstur dapat dinyatakan melalui Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM) dan entropy. Penelitian terkini pada karakterisasi permukaan material menunjukkan bahwa fitur berbasis citra dapat menangkap perubahan kondisi permukaan, membantu pemantauan proses, dan pada beberapa kasus berhubungan dengan karakteristik fisik seperti roughness (Liao et al., 2023; Prasad et al., 2024; Chethan et al., 2024). Pendekatan berbasis tekstur juga tetap berkembang dalam pemrosesan material modern, baik dengan fitur terancang maupun pendekatan deep learning (Liu & Aldrich, 2022).

Sebagian besar studi tersebut berfokus pada permukaan rigid seperti hasil machining, polishing, atau fused deposition modelling dan menggunakan citra untuk klasifikasi atau prediksi sifat permukaan. Penerapan alur analisis sederhana berbasis citra makroskopis pada membran biomaterial yang semi-transparan dan reflektif masih relatif terbatas. Selain itu, sifat reflektif dapat menimbulkan highlight yang memengaruhi intensitas dan tekstur citra sehingga pengendalian akuisisi dan interpretasi refleksi perlu dinyatakan secara eksplisit (Zhu et al., 2022).

Berdasarkan kajian tersebut, penerapan analisis citra digital untuk karakterisasi permukaan material telah berkembang pada berbagai jenis material, terutama pada permukaan hasil *machining*, *polishing*, dan proses manufaktur lainnya. Namun, penerapan pendekatan berbasis *region of interest* (ROI) yang sederhana dan dapat direplikasi untuk mengkuantifikasi perubahan visual pada membran biomaterial yang semi-transparan dan reflektif masih relatif terbatas. Selain itu, pemisahan yang jelas antara unit eksperimen dan subsampel citra penting agar hasil analisis tidak menimbulkan interpretasi statistik yang berlebihan. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan kerangka analisis citra berbasis ROI yang menggabungkan fitur warna, intensitas, dan tekstur untuk membandingkan karakteristik visual membran selulosa bakteri–kitosan dengan variasi konsentrasi *Centella asiatica*. Pendekatan ini diarahkan sebagai metode kuantifikasi visual yang sederhana, non-destruktif, dan terukur, dengan tetap memperhatikan pengaruh refleksi permukaan serta tanpa mengasumsikan bahwa fitur citra secara langsung merepresentasikan karakteristik mikrostruktur atau sifat mekanik material. Rumusan masalah penelitian adalah: (1) apakah variasi konsentrasi ekstrak menghasilkan perbedaan terukur pada fitur warna dan tekstur; (2) fitur apa yang menunjukkan respons deskriptif paling besar antarformulasi; dan (3) seberapa besar variasi lokal antar-ROI pada masing-masing membran. Berdasarkan rumusan tersebut, penelitian bertujuan mengekstraksi tujuh fitur citra dari membran 0%, 1%, 2%, dan 3%, membandingkan nilai rata-rata dan variasi intra-membran, serta mengevaluasi kemampuan alur analisis untuk mendokumentasikan perbedaan visual antarformulasi secara objektif.

KAJIAN LITERATUR/TINJAUAN PUSTAKA

Selulosa Bakteri, Kitosan, dan *Centella asiatica* sebagai Biomaterial

Selulosa bakteri merupakan biopolimer yang disintesis oleh mikroorganisme tertentu dan terbentuk sebagai jaringan fibril berukuran nano. Dibandingkan selulosa tumbuhan, selulosa bakteri memiliki tingkat kemurnian yang tinggi karena tidak disertai lignin maupun hemiselulosa. Material ini juga memiliki kemampuan retensi air, fleksibilitas, luas permukaan tinggi, dan biokompatibilitas yang menjadikannya menarik untuk pengembangan biomaterial, khususnya sebagai matriks pembalut luka (Horue et al., 2023; Hou et al., 2024). Struktur jaringan selulosa bakteri juga memungkinkan material tersebut dimodifikasi melalui penambahan polimer maupun senyawa bioaktif untuk menghasilkan sifat yang lebih sesuai dengan kebutuhan aplikasi.

Meskipun memiliki karakteristik fisik yang mendukung aplikasi biomedis, selulosa bakteri murni

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

belum sepenuhnya menyediakan fungsi biologis dan antimikroba yang diperlukan pada sistem pembalut luka. Oleh karena itu, pendekatan komposit banyak dikembangkan dengan menggabungkan selulosa bakteri dan polimer bioaktif. Kitosan merupakan salah satu biopolimer yang banyak digunakan karena bersifat biodegradable, biokompatibel, dan memiliki aktivitas antimikroba. Interaksi antara selulosa bakteri dan kitosan dapat menghasilkan material komposit dengan karakteristik permukaan dan sifat fungsional yang berbeda dari masing-masing komponen penyusunnya (Bagheri et al., 2022; Dechojarassri et al., 2023). Kajian terbaru juga menunjukkan bahwa komposit selulosa bakteri-kitosan terus dikembangkan untuk aplikasi biomedis karena kedua material tersebut memiliki karakteristik yang saling melengkapi, baik dari sisi struktur maupun fungsi (Liu et al., 2024).

Selain modifikasi menggunakan polimer, penambahan senyawa aktif berbasis bahan alam menjadi salah satu strategi untuk meningkatkan fungsi biomaterial. *Centella asiatica* mengandung kelompok triterpenoid pentasiklik seperti asiaticoside, madecassoside, asiatic acid, dan madecassic acid. Senyawa tersebut dikaitkan dengan beberapa mekanisme yang relevan terhadap penyembuhan luka, termasuk stimulasi sintesis kolagen, modulasi respons inflamasi, aktivitas antioksidan, dan dukungan terhadap regenerasi jaringan (Bandopadhyay et al., 2023; Witkowska et al., 2024). Penggunaan *Centella asiatica* bersama kitosan juga telah dikembangkan pada sistem hidrogel dan nanofiber sebagai pembawa senyawa bioaktif untuk aplikasi penyembuhan luka, yang menunjukkan bahwa kombinasi kedua bahan tersebut mempunyai potensi dalam pengembangan material biomedis berbasis polimer alami (Witkowska et al., 2023).

Perubahan komposisi membran akibat penambahan ekstrak *Centella asiatica* tidak hanya berpotensi memengaruhi karakteristik biologis, tetapi juga dapat memunculkan perbedaan pada tampilan makroskopis material. Distribusi ekstrak, proses impregnasi, pengeringan, dan interaksi antarkomponen dapat menghasilkan variasi warna, transparansi, keseragaman, maupun tekstur permukaan. Pada kondisi tersebut, pengamatan visual dapat memberikan informasi awal mengenai perbedaan antarformulasi. Namun, evaluasi yang hanya dilakukan secara visual bersifat subjektif sehingga diperlukan pendekatan yang dapat mengubah karakteristik tersebut menjadi informasi numerik yang lebih objektif.

Analisis Citra Digital untuk Karakterisasi Permukaan

Analisis citra digital merupakan pendekatan komputasional untuk mentransformasikan informasi visual menjadi parameter numerik. Dalam karakterisasi material, teknik computer vision telah digunakan untuk mendukung tahap pra-pengolahan, segmentasi, ekstraksi fitur, klasifikasi, dan kuantifikasi karakteristik pada citra material. Pendekatan ini memungkinkan informasi yang sebelumnya dinilai secara visual dikonversi menjadi data yang dapat dianalisis secara sistematis dan direplikasi (Cheng et al., 2022).

Pada citra berwarna, informasi warna dapat direpresentasikan melalui kanal *red*, *green*, dan *blue* (RGB). Nilai *mean R*, *mean G*, dan *mean B* menunjukkan rata-rata intensitas masing-masing kanal dalam suatu area citra, sedangkan konversi citra ke *grayscale* menghasilkan representasi tingkat keabuan yang dapat digunakan untuk menggambarkan kecenderungan terang atau gelap pada permukaan. Kombinasi fitur warna dan intensitas dapat digunakan untuk mendeteksi perbedaan visual antar-sampel apabila proses akuisisi citra dilakukan dalam kondisi yang konsisten.

Namun, rata-rata intensitas tidak sepenuhnya menggambarkan karakteristik spasial permukaan. Dua citra dapat memiliki nilai rata-rata intensitas yang relatif sama tetapi menunjukkan distribusi pola yang berbeda. Oleh karena itu, fitur tekstur diperlukan untuk melengkapi analisis warna. Bharati dan Liu (2004) menjelaskan bahwa analisis tekstur citra dapat digunakan untuk menangkap variasi spasial antarpiksel yang tidak direpresentasikan hanya melalui nilai intensitas rata-rata.

GLCM dan Fitur pada Karakterisasi Material

Salah satu pendekatan statistik yang banyak digunakan untuk analisis tekstur adalah *Gray-Level Co-occurrence Matrix* (GLCM). Metode ini menggambarkan hubungan spasial pasangan tingkat keabuan pada posisi, jarak, dan orientasi tertentu. Haralick et al. (1973) memperkenalkan berbagai parameter tekstur yang dapat dihitung dari GLCM, termasuk *contrast*, *homogeneity*, *energy*, dan *correlation*. Dalam penelitian ini dipilih *contrast* dan *homogeneity* karena keduanya memberikan informasi yang berbeda mengenai variasi lokal dan keseragaman intensitas.

Contrast merepresentasikan besarnya variasi lokal antar-tingkat keabuan. Nilai yang lebih tinggi menunjukkan adanya perubahan intensitas yang lebih kuat antar-area pada citra. Sebaliknya, *homogeneity*

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

menggambarkan kedekatan distribusi nilai GLCM terhadap diagonal utama, sehingga nilai yang lebih tinggi menunjukkan pola intensitas yang relatif lebih seragam. Selain kedua fitur tersebut, *entropy* digunakan untuk menggambarkan tingkat ketidakteraturan atau kompleksitas distribusi intensitas.

Penggunaan GLCM tidak terbatas pada citra biologis atau medis, tetapi juga telah diterapkan dalam karakterisasi permukaan material. Liao et al. (2023), misalnya, menggunakan fitur GLCM untuk memantau perubahan kondisi permukaan material pada proses polishing dan menunjukkan bahwa parameter tekstur dapat merepresentasikan perubahan keadaan permukaan yang tidak selalu dapat dinilai secara konsisten melalui observasi visual. Hal ini memperkuat relevansi GLCM sebagai pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi variasi tekstur pada permukaan material.

Dalam konteks penelitian ini, fitur RGB dan *grayscale* digunakan untuk menggambarkan karakteristik warna dan kecerahan, sedangkan *contrast*, *homogeneity*, dan *entropy* digunakan untuk menggambarkan variasi spasial dan kompleksitas tekstur permukaan. Fitur-fitur tersebut tidak dimaksudkan sebagai pengganti karakterisasi mikrostruktur seperti SEM, porositas, roughness, atau sifat mekanik, melainkan sebagai representasi kuantitatif terhadap tampilan makroskopis membran.

Standardisasi Akuisisi Citra dan Pengaruh Refleksi

Keandalan analisis citra sangat dipengaruhi oleh konsistensi proses akuisisi. Variasi pencahayaan, jarak kamera, sudut pemotretan, pengaturan *exposure*, *white balance*, resolusi, orientasi objek, dan latar belakang dapat menghasilkan perubahan nilai piksel yang tidak berasal dari karakteristik material itu sendiri. Oleh karena itu, proses akuisisi perlu distandarkan agar perbedaan fitur yang terukur lebih merepresentasikan perbedaan antar-sampel daripada variasi proses pemotretan.

Tahap pra-pengolahan juga memiliki peran penting dalam alur computer vision. Cheng et al. (2022) menunjukkan bahwa proses seperti peningkatan kualitas citra, segmentasi, dan pemisahan objek dari latar belakang merupakan tahapan penting sebelum dilakukan ekstraksi fitur pada citra karakterisasi material. Dalam penelitian ini, pra-pengolahan digunakan untuk memisahkan membran dari latar belakang, menentukan area analisis, dan memastikan hanya piksel yang termasuk pada permukaan membran yang digunakan untuk menghitung fitur.

Permukaan membran yang semi-transparan dan mengilap dapat menghasilkan *specular reflection* atau pantulan lokal. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan intensitas piksel pada area tertentu dan memengaruhi nilai RGB maupun fitur tekstur. Dalam penelitian ini, pengaruh refleksi tidak diinterpretasikan sebagai karakteristik intrinsik material, tetapi diperlakukan sebagai salah satu sumber variasi citra yang perlu diperhatikan pada tahap interpretasi. Karena koreksi refleksi secara algoritmik tidak diterapkan pada dataset ini, hasil analisis dibatasi pada perbandingan deskriptif citra makroskopis yang diperoleh pada kondisi pemotretan yang diseragamkan.

Kerangka Analisis dan Kontribusi Penelitian

Berdasarkan landasan teoritis yang telah diuraikan, penelitian ini menempatkan variasi konsentrasi *Centella asiatica* sebagai faktor pembeda antar-membran, sedangkan konsentrasi kitosan dipertahankan tetap. Karakteristik visual permukaan kemudian direpresentasikan melalui tujuh fitur citra, yaitu *mean R*, *mean G*, *mean B*, *mean grayscale intensity*, *contrast*, *homogeneity*, dan *entropy*. Fitur warna dan intensitas digunakan untuk menggambarkan kecenderungan perubahan kecerahan dan komposisi warna, sedangkan fitur tekstur digunakan untuk menggambarkan variasi spasial dan tingkat keseragaman pola intensitas pada permukaan membran.

Setiap citra membran dibagi menjadi sepuluh *region of interest* (ROI) untuk menangkap variasi lokal pada permukaan. Pendekatan ini memungkinkan karakteristik suatu membran tidak hanya direpresentasikan oleh satu nilai global, tetapi juga oleh distribusi fitur pada beberapa area permukaan. Meskipun demikian, sepuluh ROI tersebut tetap merupakan subsampel citra yang berasal dari satu unit membran yang sama dan tidak diperlakukan sebagai replikasi eksperimen independen. Oleh karena itu, analisis difokuskan pada perbandingan deskriptif dan eksploratif antarformulasi.

Kontribusi penelitian ini terletak pada penerapan alur analisis citra digital berbasis ROI untuk mengkuantifikasi perbedaan visual makroskopis membran selulosa bakteri–kitosan dengan variasi konsentrasi *Centella asiatica*. Pendekatan tersebut menggabungkan fitur warna, intensitas, dan tekstur sebagai representasi numerik terhadap karakteristik permukaan yang sebelumnya hanya diamati secara visual. Meskipun penelitian ini tidak mengembangkan algoritma *computer vision* baru, metode yang digunakan menawarkan pendekatan yang sederhana, non-destruktif, terukur, dan dapat direplikasi untuk mendukung karakterisasi visual biomaterial.

Hasil analisis citra dalam penelitian ini juga diposisikan sebagai informasi pendukung, bukan

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

sebagai pengganti karakterisasi fisik atau mikrostruktur. Dengan demikian, fitur citra yang diperoleh dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan untuk mengevaluasi hubungan antara karakteristik visual dengan parameter material seperti ketebalan, *swelling*, *surface roughness*, porositas, morfologi SEM, maupun sifat mekanik. Pendekatan tersebut dapat memperluas pemanfaatan analisis citra digital dari sekadar dokumentasi visual menjadi salah satu alat bantu dalam evaluasi karakteristik biomaterial.

METODE PENELITIAN

Rancangan Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan eksperimental dan analisis citra digital. Tahapan penelitian terdiri atas: (1) pembuatan membran selulosa bakteri–kitosan–*Centella asiatica*; (2) akuisisi citra makroskopis permukaan membran; (3) pra-pengolahan citra; (4) ekstraksi fitur warna dan tekstur; serta (5) analisis deskriptif fitur citra berdasarkan konsentrasi *Centella asiatica*. Analisis citra digunakan sebagai pendekatan kuantitatif untuk membandingkan karakteristik visual permukaan membran pada setiap formulasi.

Objek, Bahan, dan Perangkat

Objek penelitian adalah membran selulosa bakteri–kitosan yang diimpregnasi ekstrak *Centella asiatica*. Bahan utama meliputi selulosa bakteri, kitosan, ekstrak *Centella asiatica*, serta bahan pendukung yang digunakan pada proses pembuatan membran. Perangkat yang digunakan dalam akuisisi dan analisis citra meliputi kamera, perangkat pencahayaan, latar belakang putih, komputer, dan perangkat lunak berbasis Python.

Variasi Konsentrasi dan Unit Eksperimen

Konsentrasi kitosan dipertahankan tetap pada seluruh sampel, sedangkan variabel formulasi yang dibedakan adalah konsentrasi ekstrak *Centella asiatica* sebesar 0%, 1%, 2%, dan 3%. Setiap konsentrasi diwakili oleh satu membran, sehingga terdapat empat unit membran eksperimen. Membran dengan konsentrasi *Centella asiatica* 0% digunakan sebagai kontrol tanpa penambahan ekstrak.

Dengan demikian, terdapat empat kelompok membran, yaitu C0 untuk konsentrasi 0%, C1 untuk 1%, C2 untuk 2%, dan C3 untuk 3%. Karena setiap konsentrasi hanya diwakili oleh satu membran, penelitian ini tidak menggunakan replikasi eksperimen pada tingkat formulasi. Oleh karena itu, analisis difokuskan pada karakterisasi dan perbandingan deskriptif terhadap citra permukaan membran.

Akuisisi dan Standardisasi Citra

Setiap membran didokumentasikan dalam satu citra makroskopis resolusi penuh menggunakan perangkat kamera yang sama. Kondisi pengambilan gambar dipertahankan seseragam mungkin, meliputi posisi kamera, orientasi sampel, latar belakang, dan pencahayaan. Kamera ditempatkan tegak lurus terhadap permukaan membran untuk meminimalkan distorsi geometrik, sedangkan seluruh sampel ditempatkan pada latar belakang putih dengan orientasi yang serupa.

Informasi kuantitatif seperti model kamera, jarak kamera, nilai *exposure*, *white balance*, serta intensitas pencahayaan tidak seluruhnya tercatat pada tahap akuisisi awal. Oleh karena itu, aspek tersebut diperlakukan sebagai keterbatasan pada reproduktibilitas absolut sistem akuisisi. Meskipun demikian, seluruh citra yang dianalisis diperoleh menggunakan prosedur pemotretan yang sama sehingga perbandingan dilakukan dalam satu kondisi akuisisi yang konsisten.

Karena permukaan membran bersifat semi-transparan dan mengilap, sebagian area menunjukkan pantulan cahaya lokal. Pada penelitian ini tidak diterapkan koreksi *specular reflection* secara algoritmik. Pengaruh refleksi diminimalkan melalui penggunaan pencahayaan yang seragam dan dipertimbangkan sebagai faktor pengganggu pada tahap interpretasi hasil.

Pra-pengolahan dan Segmentasi Citra

Pra-pengolahan citra dilakukan menggunakan Python sebelum ekstraksi fitur. Tahapan pra-pengolahan meliputi pembacaan citra, identifikasi area membran, pemisahan membran dari latar belakang putih, penentuan *bounding box*, pembagian area membran menjadi ROI, pembacaan kanal RGB, dan konversi citra menjadi *grayscale*.

Segmentasi digunakan untuk memastikan bahwa hanya area permukaan membran yang dianalisis, sehingga piksel latar belakang tidak ikut memengaruhi nilai fitur. Pemisahan objek dilakukan berdasarkan perbedaan intensitas dan warna antara membran dan latar belakang putih. Mask hasil segmentasi kemudian digunakan untuk membatasi area piksel yang dipakai pada perhitungan fitur warna dan tekstur.

Pada dataset ini, segmentasi dilakukan secara deterministik dengan aturan pemisahan objek–latar yang sama pada seluruh citra. Area dengan pantulan lokal tidak dihapus secara selektif karena penghilangan manual dapat menimbulkan bias subjektif. Sebaliknya,

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

pengaruh area reflektif dipertimbangkan pada interpretasi distribusi nilai fitur antar-ROI.

Ekstraksi Fitur Citra

Tujuh fitur citra diekstraksi dari setiap ROI. Fitur warna terdiri atas *mean R*, *mean G*, *mean B*, dan *mean grayscale intensity*. Nilai *mean R*, *mean G*, dan *mean B* digunakan untuk menggambarkan rata-rata intensitas masing-masing kanal warna, sedangkan *mean grayscale intensity* digunakan untuk merepresentasikan kecenderungan terang–gelap pada area permukaan.

Fitur tekstur terdiri atas *contrast*, *homogeneity*, dan *entropy*. Nilai *contrast* dan *homogeneity* dihitung menggunakan *Gray-Level Co-occurrence Matrix* (GLCM) (Haralick et al., 1973). GLCM dihitung pada jarak 1 piksel dan arah 0°, 45°, 90°, dan 135°, kemudian nilai dari seluruh arah dirata-ratakan untuk mengurangi ketergantungan terhadap orientasi tekstur.

Contrast digunakan untuk merepresentasikan variasi lokal intensitas keabuan, sedangkan *homogeneity* digunakan untuk menggambarkan tingkat keseragaman distribusi intensitas. *Entropy* dihitung menggunakan Shannon entropy pada citra *grayscale* dan digunakan untuk menggambarkan tingkat keragaman atau kompleksitas distribusi intensitas.

Definisi Operasional Variabel

1) Konsentrasi *Centella asiatica*: 0%, 1%, 2%, dan 3% sebagai faktor pembeda antar-membran.
2) Fitur warna: *mean R, mean G, mean B*, dan *mean grayscale intensity.*
3) Fitur tekstur: *contrast, homogeneity, dan entropy.*
4) Unit eksperimen: satu membran untuk setiap konsentrasi *Centella asiatica*.
5) Unit analisis citra: satu ROI pada permukaan membran; sepuluh ROI berasal dari satu membran yang sama.

Pengolahan dan Analisis Data

Hasil ekstraksi fitur disusun dalam dataset yang memuat *Sample ID*, konsentrasi *Centella asiatica*, *ROI ID*, *mean R*, *mean G*, *mean B*, *mean grayscale intensity*, *contrast*, *homogeneity*, dan *entropy*. Untuk setiap membran dihitung nilai rata-rata dan standar deviasi dari sepuluh ROI. Perbandingan antar-konsentrasi disajikan dalam bentuk tabel dan grafik menggunakan nilai rata-rata ± standar deviasi dari sepuluh ROI. Nilai standar deviasi digunakan untuk menggambarkan variasi spasial atau heterogenitas visual pada permukaan satu membran, bukan variasi antar-replikasi formulasi.

Keberhasilan proses analisis dievaluasi berdasarkan kelengkapan ekstraksi tujuh fitur pada seluruh 40 ROI dan kemampuan fitur yang diperoleh untuk menggambarkan perbedaan karakteristik visual antarformulasi secara deskriptif. Nilai rata-rata dan standar deviasi digunakan untuk merepresentasikan kecenderungan serta heterogenitas lokal pada masing-masing membran.

Analisis data bersifat deskriptif dan eksploratif karena setiap konsentrasi hanya memiliki satu membran sebagai unit eksperimen. Untuk menghindari *pseudoreplication*, sepuluh ROI dari satu membran tidak dianggap sebagai sepuluh replikasi formulasi. Oleh karena itu, data ROI digunakan untuk menggambarkan distribusi karakteristik visual lokal pada permukaan membran dan tidak digunakan untuk melakukan inferensi statistik mengenai pengaruh konsentrasi terhadap populasi membran secara umum.

Perangkat Lunak

Pengolahan citra dilakukan menggunakan Python. OpenCV dan NumPy digunakan untuk pembacaan citra, segmentasi, manipulasi array, konversi warna, dan perhitungan statistik intensitas. Sementara itu, *scikit-image* digunakan untuk ekstraksi fitur tekstur berbasis GLCM dan perhitungan *entropy*. Penggunaan pustaka Python memungkinkan proses analisis dilakukan secara terstruktur, konsisten, dan dapat direplikasi (van der Walt et al., 2014).

Penyajian Hasil

Hasil penelitian disajikan dalam bentuk: (1) citra permukaan membran pada setiap konsentrasi *Centella asiatica*; (2) tabel statistik deskriptif tujuh fitur citra berdasarkan sepuluh ROI pada setiap membran; (3) grafik fitur warna dan *mean grayscale intensity*; serta (4) grafik *contrast*, *homogeneity*, dan *entropy* terhadap variasi konsentrasi *Centella asiatica*. Penyajian ini digunakan untuk memperlihatkan kecenderungan perubahan karakteristik visual antarformulasi sekaligus menggambarkan heterogenitas lokal pada masing-masing permukaan membran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Visual Membran

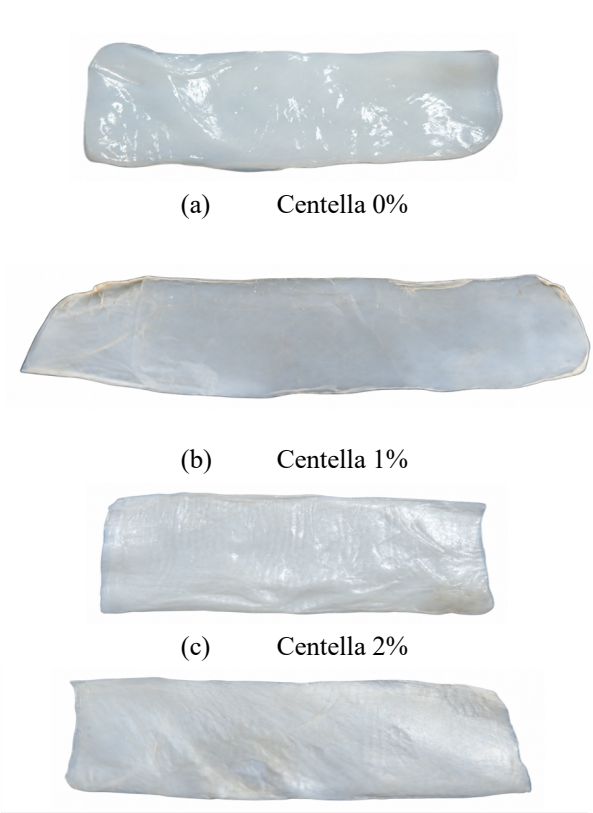
Secara visual, keempat membran menunjukkan karakteristik permukaan yang berbeda meskipun secara umum memiliki warna putih kebiruan hingga semi-transparan. Membran kontrol 0% memperlihatkan beberapa area reflektif dan lipatan permukaan, sedangkan membran 1% tampak relatif lebih gelap dibandingkan formulasi lainnya. Membran 2%

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ISSN: 2598-8565 (media cetak)
ISSN: 2620-4339 (media online)

menunjukkan tampilan paling cerah, sementara membran 3% tetap memiliki tingkat kecerahan relatif tinggi dengan variasi tekstur lokal yang terlihat pada beberapa bagian permukaan.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa variasi konsentrasi ekstrak *Centella asiatica* dapat diikuti oleh perubahan tampilan makroskopis membran. Namun, pengamatan secara visual belum cukup untuk menentukan besarnya perbedaan antarformulasi karena dipengaruhi oleh persepsi pengamat dan kondisi pencahayaan. Oleh karena itu, citra makroskopis selanjutnya dianalisis secara kuantitatif melalui fitur warna, intensitas, dan tekstur.



(a) Centella 0%

(b) Centella 1%

(c) Centella 2%

(d) Centella 3%

Gambar 1. Perbandingan visual membran selulosa bakteri–kitosan yang diimpregnasi ekstrak *Centella asiatica* dengan variasi konsentrasi (a) 0%, (b) 1%, (c) 2%, dan (d) 3%.

Hasil Ekstraksi Fitur Citra

Satu citra utuh dari masing-masing membran dibagi secara digital menjadi sepuluh *region of interest* (ROI) menggunakan pola grid 2 × 5, sehingga diperoleh total 40 ROI dari empat membran. Setiap ROI dianalisis untuk memperoleh tujuh fitur citra yang terdiri atas empat fitur warna/intensitas, yaitu *mean R*, *mean G*, *mean B*, dan *mean grayscale intensity*, serta tiga fitur tekstur, yaitu *contrast*, *homogeneity*, dan *entropy*.

Nilai setiap fitur pada satu membran diringkas dalam bentuk rata-rata ± standar deviasi dari sepuluh ROI. Dalam penelitian ini, standar deviasi tidak merepresentasikan variasi antar-replikasi formulasi, tetapi digunakan untuk menggambarkan heterogenitas spasial atau variasi lokal pada satu permukaan membran. Dengan demikian, hasil ekstraksi fitur digunakan sebagai dasar untuk membandingkan karakteristik visual keempat membran secara deskriptif.

Tabel 1. Fitur warna rata-rata ± standar deviasi dari 10 ROI per membran.

Centella (%)	Mean R	Mean G	Mean B	Mean Gray
0	193.8 ± 5.1	203.2 ± 5.2	206.8 ± 5.1	200.8 ± 5.1
1	179.6 ± 8.5	186.7 ± 8.3	192.3 ± 8.8	185.2 ± 8.3
2	199.4 ± 5.7	206.1 ± 6.0	210.1 ± 7.0	204.5 ± 6.0
3	194.4 ± 7.6	200.1 ± 6.9	203.5 ± 6.6	198.8 ± 7.1

Tabel 2. Fitur tekstur rata-rata ± standar deviasi dari 10 ROI per membran.

Centella (%)	Contrast	Homogeneity	Entropy
0	1.89 ± 0.90	0.802 ± 0.062	4.93 ± 0.72
1	0.70 ± 0.15	0.827 ± 0.018	4.92 ± 0.35
2	1.32 ± 0.82	0.724 ± 0.083	5.43 ± 0.54
3	0.61 ± 0.31	0.778 ± 0.055	5.31 ± 0.49

Perubahan Warna dan Kecerahan Permukaan

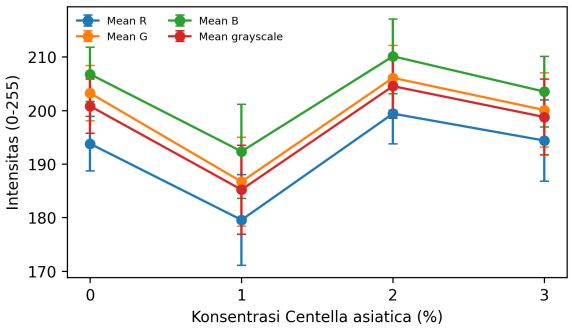
Nilai *mean grayscale intensity* menunjukkan adanya perbedaan kecerahan antarformulasi, tetapi tidak meningkat atau menurun secara monoton terhadap konsentrasi *Centella asiatica*. Nilai terendah diperoleh pada membran 1%, yaitu 185,2 ± 8,3, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada membran 2%, yaitu 204,5 ± 6,0. Membran 0% dan 3% masing-masing memiliki nilai *mean grayscale* sebesar 200,8 ± 5,1 dan 198,8 ± 7,1.

Pola yang relatif serupa ditemukan pada kanal R, G, dan B. Membran 1% mempunyai intensitas ketiga kanal yang paling rendah, sedangkan membran 2% menunjukkan intensitas tertinggi. Pada seluruh formulasi, nilai kanal B cenderung lebih tinggi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ISSN: 2598-8565 (media cetak)
ISSN: 2620-4339 (media online)

dibandingkan kanal R dan G, yang sesuai dengan tampilan putih-kebiruan pada citra makroskopis.



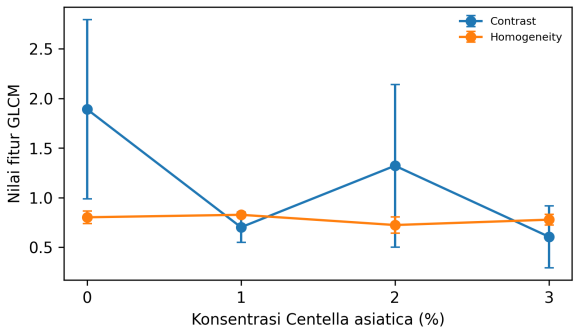
Gambar 2. Rata-rata fitur warna dan *Mean Grayscale* pada 10 ROI setiap membran.

Tidak ditemukannya hubungan linear antara peningkatan konsentrasi *Centella asiatica* dan tingkat kecerahan menunjukkan bahwa nilai intensitas citra tidak dapat diinterpretasikan sebagai respons langsung terhadap konsentrasi ekstrak. Distribusi ekstrak yang tidak sepenuhnya homogen dapat menyebabkan sebagian area menyerap atau memantulkan cahaya dengan intensitas yang berbeda. Selain itu, variasi ketebalan lokal dan perubahan struktur permukaan akibat proses impregnasi maupun pengeringan dapat memengaruhi cahaya yang diteruskan atau dipantulkan oleh membran.

Sifat membran yang semi-transparan dan mengilap juga perlu diperhatikan. Pantulan cahaya lokal dapat meningkatkan nilai intensitas pada ROI tertentu sehingga menyebabkan nilai rata-rata antar-area menjadi lebih bervariasi. Oleh karena itu, hasil fitur RGB dan *grayscale* dalam penelitian ini diinterpretasikan sebagai representasi karakteristik visual citra, bukan sebagai pengukuran langsung terhadap konsentrasi senyawa aktif di dalam membran.

Perubahan Tekstur Permukaan

Karakteristik tekstur menunjukkan pola yang berbeda dibandingkan fitur warna. Nilai *contrast* tertinggi diperoleh pada membran 0%, yaitu 1,89 ± 0,90, kemudian membran 2% sebesar 1,32 ± 0,82, membran 1% sebesar 0,70 ± 0,15, dan membran 3% sebesar 0,61 ± 0,31. *Contrast* merepresentasikan besarnya perbedaan intensitas lokal pada citra, sehingga nilai yang lebih tinggi menunjukkan variasi spasial tingkat keabuan yang lebih kuat (Haralick et al., 1973).



Gambar 3. Rata-rata *Contrast* dan *Homogeneity* pada 10 ROI setiap membran.

Sebaliknya, nilai *homogeneity* tertinggi diperoleh pada membran 1%, yaitu 0,827 ± 0,018, diikuti membran 0% sebesar 0,802 ± 0,062, membran 3% sebesar 0,778 ± 0,055, dan membran 2% sebesar 0,724 ± 0,083. Nilai *homogeneity* yang lebih tinggi menunjukkan bahwa distribusi pasangan tingkat keabuan pada citra lebih terkonsentrasi di sekitar diagonal matriks GLCM sehingga pola intensitas permukaan relatif lebih seragam.

Gambar 3 memperlihatkan bahwa tingkat kecerahan tidak selalu berkaitan langsung dengan keseragaman tekstur. Membran 2%, misalnya, mempunyai *mean grayscale intensity* tertinggi, tetapi justru menunjukkan *homogeneity* terendah. Sebaliknya, membran 1% memiliki tingkat kecerahan paling rendah tetapi *homogeneity* tertinggi. Perbedaan ini menunjukkan bahwa fitur warna/intensitas dan fitur tekstur menangkap aspek visual yang berbeda dan saling melengkapi.

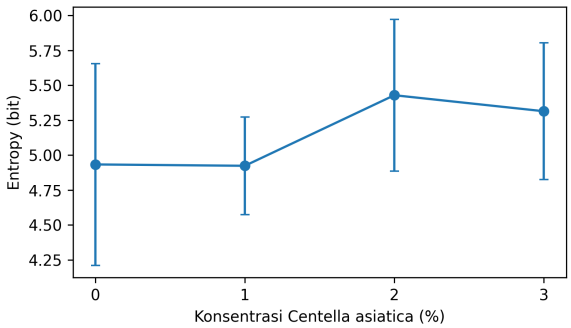
Nilai standar deviasi *contrast* pada membran 0% dan 2% juga relatif lebih besar dibandingkan membran 1% dan 3%. Hal tersebut menunjukkan adanya variasi lokal yang lebih besar di antara ROI pada kedua membran tersebut. Variasi tersebut dapat berkaitan dengan distribusi permukaan yang tidak seragam, lipatan, perubahan ketebalan lokal, maupun area reflektif. Namun, karena karakterisasi mikrostruktur permukaan tidak dilakukan dalam penelitian ini, perbedaan nilai GLCM tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai perubahan porositas, roughness, atau morfologi mikro.

Entropy dan Kompleksitas Intensitas

Nilai *entropy* rata-rata pada membran 0%, 1%, 2%, dan 3% masing-masing sebesar 4,93 ± 0,72; 4,92 ± 0,35; 5,43 ± 0,54; dan 5,31 ± 0,49. Dengan demikian, membran 2% dan 3% menunjukkan nilai *entropy* yang lebih tinggi dibandingkan membran 0% dan 1%.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ISSN: 2598-8565 (media cetak)
ISSN: 2620-4339 (media online)



Gambar 4. Rata-rata *Entropy* pada 10 ROI setiap membran.

Entropy menggambarkan keragaman distribusi intensitas dalam citra. Nilai yang lebih tinggi menunjukkan bahwa distribusi tingkat keabuan cenderung lebih kompleks atau kurang teratur. Pada membran yang diamati, formulasi 2% dan 3% mempunyai distribusi intensitas yang relatif lebih kompleks dibandingkan formulasi 0% dan 1%.

Meskipun demikian, perubahan *entropy* juga tidak membentuk pola monoton pada seluruh variasi konsentrasi. Oleh karena itu, nilai yang lebih tinggi pada formulasi 2% dan 3% belum dapat digunakan untuk menyimpulkan adanya hubungan kausal antara peningkatan konsentrasi *Centella asiatica* dan peningkatan kompleksitas tekstur. Pola tersebut lebih tepat diperlakukan sebagai indikasi adanya perbedaan karakteristik visual antar-membran yang dapat ditangkap melalui analisis citra.

Interpretasi Umum dan Keterbatasan

Secara keseluruhan, ekstraksi tujuh fitur dari 40 ROI menunjukkan bahwa analisis citra digital mampu mengubah karakteristik visual permukaan membran menjadi parameter numerik yang dapat dibandingkan. Fitur *mean R*, *mean G*, *mean B*, dan *mean grayscale intensity* memberikan informasi mengenai warna dan tingkat kecerahan, sedangkan *contrast*, *homogeneity*, dan *entropy* memberikan informasi tambahan mengenai variasi spasial, keseragaman, dan kompleksitas distribusi intensitas.

Hasil juga memperlihatkan bahwa tidak terdapat satu fitur tunggal yang secara konsisten meningkat atau menurun mengikuti peningkatan konsentrasi *Centella asiatica*. Hal ini menunjukkan bahwa respons visual membran bersifat kompleks dan kemungkinan dipengaruhi oleh kombinasi distribusi ekstrak, proses impregnasi, pengeringan, ketebalan lokal, serta karakter optik permukaan. Dengan demikian, penggunaan kombinasi fitur warna dan tekstur memberikan representasi yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan satu parameter citra saja.

Pendekatan berbasis ROI memberikan keuntungan karena memungkinkan heterogenitas lokal dalam satu permukaan membran diamati melalui variasi nilai antar-area. Namun, sepuluh ROI yang berasal dari satu membran merupakan subsampel citra dan bukan replikasi eksperimen independen. Setiap konsentrasi dalam penelitian ini hanya diwakili oleh satu membran sehingga hasil yang diperoleh hanya mendukung interpretasi deskriptif dan eksploratif. Oleh karena itu, perbedaan antarformulasi tidak digunakan untuk melakukan pengujian statistik inferensial mengenai pengaruh konsentrasi *Centella asiatica*.

Keterbatasan lainnya berkaitan dengan sifat permukaan membran yang mengilap dan semi-transparan. Pantulan cahaya lokal dapat memengaruhi nilai intensitas dan tekstur pada sebagian ROI. Meskipun kondisi pengambilan citra dipertahankan seragam, koreksi *specular reflection* secara algoritmik belum diterapkan sehingga pengaruh refleksi tetap menjadi salah satu sumber variasi pada data citra.

Analisis citra dalam penelitian ini juga belum divalidasi secara langsung menggunakan karakterisasi fisik atau mikrostruktur. Oleh karena itu, nilai *contrast*, *homogeneity*, dan *entropy* tidak dapat langsung diasosiasikan dengan porositas, kekasaran permukaan, ketebalan, atau sifat mekanik membran. Penelitian selanjutnya dapat melibatkan replikasi membran independen serta menghubungkan fitur citra dengan parameter material seperti ketebalan, *swelling*, *surface roughness*, citra SEM, porositas, atau sifat mekanik. Pendekatan tersebut dapat digunakan untuk mengevaluasi apakah fitur citra makroskopis memiliki hubungan yang konsisten dengan karakteristik fisik material.

Dengan mempertimbangkan keterbatasan tersebut, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa analisis citra digital berbasis ROI dapat digunakan sebagai pendekatan pendukung yang sederhana dan non-destruktif untuk mendokumentasikan serta mengkuantifikasi perbedaan visual makroskopis pada membran selulosa bakteri–kitosan dengan variasi *Centella asiatica*.

KESIMPULAN

Analisis citra digital berbasis *region of interest* (ROI) mampu mengkuantifikasi perbedaan visual makroskopis pada membran selulosa bakteri–kitosan dengan variasi konsentrasi *Centella asiatica* melalui kombinasi fitur warna, intensitas, dan tekstur. Dari empat formulasi yang dianalisis, membran 1% menunjukkan *mean grayscale intensity* terendah dan *homogeneity* tertinggi, sedangkan membran 2% memiliki *mean grayscale intensity* tertinggi dan

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

homogeneity terendah. Nilai *contrast* tertinggi diperoleh pada membran 0%, sementara nilai *entropy* pada membran 2% dan 3% lebih tinggi dibandingkan membran 0% dan 1%.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa fitur warna dan fitur tekstur memberikan informasi visual yang berbeda dan saling melengkapi. Perubahan fitur tidak menunjukkan pola monoton terhadap peningkatan konsentrasi *Centella asiatica*, sehingga karakteristik visual permukaan kemungkinan dipengaruhi oleh kombinasi distribusi ekstrak, proses impregnasi dan pengeringan, ketebalan lokal, serta karakter optik membran.

Pendekatan analisis citra yang digunakan berhasil menghasilkan tujuh fitur pada seluruh 40 ROI dan dapat digunakan untuk mendeskripsikan heterogenitas lokal serta perbedaan visual antarformulasi secara deskriptif. Namun, karena setiap konsentrasi hanya diwakili oleh satu membran, sepuluh ROI pada masing-masing membran tidak dapat dianggap sebagai replikasi eksperimen independen. Oleh karena itu, hasil penelitian ini belum dapat digunakan untuk menyimpulkan pengaruh konsentrasi *Centella asiatica* secara inferensial.

Analisis citra digital dalam penelitian ini dapat digunakan sebagai metode pendukung yang sederhana dan non-destruktif untuk karakterisasi visual biomaterial. Validasi lebih lanjut menggunakan replikasi membran independen dan karakterisasi fisik atau mikrostruktur, seperti ketebalan, *swelling*, *surface roughness*, SEM, porositas, atau sifat mekanik, diperlukan untuk menguji hubungan antara fitur citra dan karakteristik material secara lebih kuat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Sultan Ageng Tirtayasa atas dukungan pendanaan melalui Hibah Internal UNTIRTA, skema Penelitian Dosen Pemula Tahun 2026. Dukungan tersebut telah memberikan kontribusi penting terhadap pelaksanaan penelitian ini, mulai dari tahap persiapan, pengumpulan data, hingga analisis hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Bagheri, M., Validi, M., Gholipour, A., Makvandi, P., & Sharifi, E. (2022). Chitosan nanofiber biocomposites for potential wound healing applications: Antioxidant activity with synergic antibacterial effect. *Bioengineering & Translational Medicine, 7*(1), e10254. https://doi.org/10.1002/btm2.10254

Bandopadhyay, S., Mandal, S., Ghorai, M., Jha, N. K., Kumar, M., Radha, Ghosh, A., Proćków, J., Pérez de la Lastra, J. M., & Dey, A. (2023). Therapeutic properties and pharmacological activities of asiaticoside and madecassoside: A review. *Journal of Cellular and Molecular Medicine, 27*(5), 593–608. https://doi.org/10.1111/jcmm.17635

Bharati, M. H., & Liu, J. J. (2004). Image texture analysis: Methods and comparisons. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 72*(1), 57–71. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.02.005

Cheng, D., Sha, W., Xu, Z., Huang, L., Du, Y., Tang, S., Guo, Y., Cao, Y., & Cheng, S. (2022). Computer vision analysis on material characterization images. *Advanced Intelligent Systems, 4*(3), 2100158. https://doi.org/10.1002/aisy.202100158

Chethan, Y. D., Poojith, M., & Sharath Kumar, Y. H. (2024). Machine vision assisted fused deposition modelling process optimization using grey level co-occurrence matrix. *Materials Today: Proceedings, 98*, 109–117. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.205

Dechojarassri, D., Okada, T., Tamura, H., & Furuike, T. (2023). Evaluation of cytotoxicity of hyaluronic acid/chitosan/bacterial cellulose-based membrane. *Materials, 16*(14), 5189. https://doi.org/10.3390/ma16145189

Haralick, R. M., Shanmugam, K., & Dinstein, I. (1973). Textural features for image classification. *IEEE* Transactions *on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-3*(6), 610–621. https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314

Horue, M., Silva, J. M., Berti, I. R., Brandão, L. R., Barud, H. S., & Castro, G. R. (2023). Bacterial cellulose-based materials as dressings for wound healing. *Pharmaceutics, 15*(2), 424. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15020424

Hou, S., Xia, Z., Pan, J., Wang, N., Gao, H., Ren, J., & Xia, X. (2024). Bacterial cellulose applied in wound dressing materials: Production and functional modification—A review. *Macromolecular Bioscience, 24*(2), 2300333. https://doi.org/10.1002/mabi.202300333

Liao, D., Xie, R., Zhao, S., & Xu, Q. (2023). Monitoring of the glazing state of the pitch polishing lap by an image texture analysis method in full-aperture continuous polishing. *Applied Optics, 62*(17), 4551–4556. https://doi.org/10.1364/AO.490157

Liu, K., Wang, Y., Liu, W., Zheng, C., Xu, T., Du, H., Yuan, Z., & Si, C. (2024). Bacterial cellulose/chitosan composite materials for biomedical applications. *Chemical Engineering Journal, 494*, 153014. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153014

Liu, X., & Aldrich, C. (2022). Deep learning approaches to image texture analysis in material processing. *Metals, 12*(2), 355. https://doi.org/10.3390/met12020355

Prasad, G., Gaddale, V. S., Kamath, R. C., Shekaranaik, V. J., & Pai, S. P. (2024). A study

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ISSN: 2598-8565 (media cetak)
ISSN: 2620-4339 (media online)

of dimensionality reduction in GLCM feature-based classification of machined surface images. *Arabian Journal for Science and Engineering, 49*, 1531–1553. https://doi.org/10.1007/s13369-023-07854-1

van der Walt, S., Schönberger, J. L., Nunez-Iglesias, J., Boulogne, F., Warner, J. D., Yager, N., Gouillart, E., & Yu, T. (2014). scikit-image: Image processing in Python. *PeerJ, 2*, e453. https://doi.org/10.7717/peerj.453

Witkowska, K., Paczkowska-Walendowska, M., Garbiec, E., & Cielecka-Piontek, J. (2024). Topical application of *Centella asiatica* in wound healing: Recent insights into mechanisms and clinical efficacy. *Pharmaceutics, 16*(10), 1252. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16101252

Witkowska, K., Paczkowska-Walendowska, M., Plech, T., Szymanowska, D., Michniak-Kohn, B., & Cielecka-Piontek, J. (*2023*). Chitosan-based hydrogels for controlled delivery of asiaticoside-rich *Centella asiatica* extracts with wound healing potential. *International Journal of Molecular Sciences, 24*(24), 17229. https://doi.org/10.3390/ijms242417229

Zhu, Z., Li, X., Zhang, J., Zhou, Y., & Zhao, Y. (2022). Specular flare suppression method for reflective materials based on the optimal polarizing angle. *Applied Optics, 61*(27), 8034–8041. https://doi.org/10.1364/AO.469240

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.