



ARECA ANALYZER: SISTEM KOLORIMETRI BERBASIS WEB MENGGUNAKAN EKSTRAK KUBIS MERAH UNTUK DETEKSI DINI ORAL SUBMUCOUS FIBROSIS

**Nafisa Azka Azzaliya¹, Kurnia Ramadhani², Muhammad Rassesha Rassat³,
Muhammad Fakhri⁴, Yulian Supradinata⁵**
MAN Insan Cendekia OKI, Indonesia ^{1,2,3,4,5}
E-mail: nafisa@gmail.com

Diterima: 13/9/2026; Direvisi: 1/10/2026; Diterbitkan: 6/10/2026

ABSTRACT

Oral Submucous Fibrosis (OSMF) is a chronic, progressive, and potentially malignant disorder of the oral cavity that predominantly affects individuals with habitual betel quid chewing practices in rural populations. This study developed the ARECA Analyzer as a non-invasive preliminary screening prototype based on salivary Ph determination utilizing natural anthocyanin immobilized from red cabbage extract (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*). The colorimetric response of the fabricated paper strip was captured via an optical camera and processed through a web application utilizing an automated RGB (*Red-Green-Blue*) interpretation algorithm. Experimental evaluations across standard buffer solutions ranging from Ph 5 to 8 demonstrated distinct and reproducible chromatic transitions with an intra-assay variation under 5%. Quantitative validation against a calibrated digital Ph meter showed high analytic performance with an average deviation of ± 0.18 units and an accuracy level of 97.25%. The web system successfully translated color transitions into digital Ph readouts and categorized health risk profiles accompanied by preliminary dietary recommendations. In conclusion, the ARECA Analyzer proves effective as a natural, low-cost *proof-of-concept* colorimetric tool for detecting salivary Ph shifts, serving as a functional preliminary stage prior to formal clinical examinations.

Keywords: *Anthocyanin, ARECA Analyzer, Colorimetric Biosensor, Oral Submucous Fibrosis, Salivary Ph.*

ABSTRAK

Oral Submucous Fibrosis (OSMF) merupakan penyakit kronis progresif pada rongga mulut yang berstatus prakanker dan banyak dipicu oleh kebiasaan mengunyah biji pinang secara turun-temurun di wilayah pedesaan. Penelitian ini mengembangkan ARECA Analyzer sebagai purwarupa skrining awal non-invasif berbasis deteksi Ph saliva menggunakan pigmen antosianin alami dari ekstrak kol ungu (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*). Respons kolorimetri pada substrat kertas indikator direkam menggunakan kamera optik dan diproses melalui aplikasi web dengan algoritma interpretasi koordinat RGB (*Red-Green-Blue*) secara terkomputasi. Pengujian laboratorium pada larutan penyangga rentang Ph 5 hingga 8 menghasilkan perubahan warna yang tegas dan konsisten dengan variasi replikasi di bawah 5%. Validasi kuantitatif terhadap Ph meter digital standar menunjukkan kinerja analitik yang tinggi dengan selisih pembacaan rata-rata sebesar $\pm 0,18$ unit serta tingkat akurasi mencapai 97,25%. Sistem web berhasil mengonversi citra warna menjadi data numerik Ph serta menampilkan klasifikasi stratifikasi risiko kesehatan yang disertai rujukan penanganan awal. Kesimpulannya, indikator ARECA terbukti berfungsi efektif sebagai instrumen kolorimetri alami berbiaya

terjangkau dalam mendeteksi pergeseran Ph secara *in vitro* sebagai tahap penapisan awal sebelum pemeriksaan medis lanjutan.

Kata Kunci: *Antosianin, ARECA Analyzer, Biosensor Kolorimetri, Oral Submucous Fibrosis, Ph Saliva.*

PENDAHULUAN

Oral Submucous Fibrosis (OSMF) merupakan kelainan rongga mulut kronis dan progresif yang tergolong ke dalam kelompok *oral potentially malignant disorders* (OPMD) dengan kecenderungan transformasi keganasan yang tinggi. Transformasi menuju karsinoma sel skuamosa rongga mulut dapat berlangsung dalam kurun waktu 5 hingga 10 tahun pascadiagnosis awal apabila lesi fibrotik tidak ditangani secara adekuat (Meci et al., 2025). Etiologi primer penyakit ini berakar kuat pada kebiasaan mengunyah biji pinang (*Areca catechu* L.) yang dikonsumsi bersama kapur sirih, daun sirih, atau tembakau dalam tradisi menyirih masyarakat agraris (Kazemi et al., 2025; Zhang et al., 2022). Rendahnya literasi kesehatan, hambatan finansial, serta keterbatasan akses terhadap dokter gigi spesialis di daerah pelosok menyebabkan mayoritas pasien baru mencari pengobatan saat sudah memasuki stadium lanjut (Gupta et al., 2025). Akibatnya, penderita mengalami keterbatasan pembukaan mulut (*trismus*), sensasi terbakar yang intens (*burning sensation*), atrofi mukosa, hingga penurunan kualitas hidup yang parah (Kuupiel et al., 2017).

Penegakan diagnosis OSMF saat ini bertumpu pada pemeriksaan klinis visual konvensional dan konfirmasi histopatologi melalui biopsi jaringan mukosa. Walaupun biopsi jaringan merupakan standar baku emas (*gold standard*), prosedur ini bersifat invasif, menimbulkan rasa nyeri, membutuhkan keterampilan bedah minor, serta memakan biaya yang relatif mahal (Bisht et al., 2021). Kondisi infrastruktur fasilitas kesehatan tingkat pertama di wilayah rural sering kali belum memadai untuk menyelenggarakan pembedahan biopsi maupun evaluasi sitologi secara rutin (Kuupiel et al., 2017). Di samping itu, keengganan masyarakat untuk menjalani prosedur operatif invasif menyebabkan banyak lesi pra-kanker luput dari deteksi dini (Gupta et al., 2025). Berdasarkan kendala tersebut, pengembangan metode penapisan awal yang bersifat non-invasif, murah, cepat, dan mandiri menjadi sebuah kebutuhan yang sangat mendesak.

Salah satu parameter biologis non-invasif yang sangat potensial digunakan sebagai indikator kesehatan rongga mulut adalah karakteristik fisikokimia cairan saliva. Alkaloid dan senyawa fenolik pinang terbukti menginduksi pembentukan *reactive oxygen species* (ROS) yang memicu peradangan kronis dan stres oksidatif persisten pada jaringan mukosa rongga mulut (Zhang et al., 2022). Paparan metabolit sekunder pinang secara terus-menerus terbukti mengganggu kapasitas dapar bikarbonat saliva dan menurunkan sekresi saliva, sehingga menciptakan pergeseran lingkungan mikro mulut ke arah asam dengan nilai Ph di bawah 6,5 (Ghalwash, 2020; Poimenidou et al., 2025). Fluktuasi derajat keasaman saliva ini mencerminkan keparahan inflamasi dan disfungsi kelenjar saliva sebelum perubahan anatomi makroskopis tampak secara nyata (Poimenidou et al., 2025). Oleh sebab itu, pemantauan dinamika Ph saliva dapat difungsikan sebagai salah satu biomarker komplementer untuk mengenali tanda bahaya awal degradasi jaringan rongga mulut.

Pengukuran Ph saliva menggunakan kertas lakmus atau strip Ph komersial konvensional masih memiliki sejumlah kelemahan operasional yang mendasar. Evaluasi perubahan warna strip konvensional umumnya mengandalkan inspeksi mata telanjang dengan mencocokkan strip ke bagan warna rujukan secara subjektif. Metode manual ini rentan memicu bias pembacaan

akibat variasi persepsi visual pemeriksa, perbedaan temperatur warna lampu ruangan, dan sudut datang pencahayaan (Qian et al., 2022). Dampaknya, interpretasi hasil uji menjadi kurang konsisten, memiliki presisi yang rendah, serta sulit terdokumentasi secara digital untuk keperluan pemantauan berkala (Abedi-Firoozjah et al., 2022). Di sisi lain, penggunaan elektroda kaca pada instrumen Ph meter digital komersial memerlukan kalibrasi larutan penyangga yang rumit serta perawatan sensor yang teliti, sehingga kurang praktis digunakan oleh masyarakat awam (Halász et al., 2023).

Pemanfaatan indikator alami berbasis fitokimia nabati menawarkan alternatif sensor kimia yang aman, terjangkau, dan sejalan dengan kaidah *green chemistry*. Ekstrak kol ungu (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*) diketahui melimpah akan pigmen antosianin jenis sianidin-3-diglukosida-5-glukosida yang sangat stabil (Edward et al., 2025). Molekul antosianin memiliki struktur kimia unik yang mengalami penataan ulang ikatan rangkap terkonjugasi menjadi kation flavilium, basa kuinoidal, karbinol pseudobasa, atau kalkon saat bereaksi dengan ion hidrogen (Abedi-Firoozjah et al., 2022). Transformasi struktural ini menghasilkan gradasi perubahan warna visual yang sangat kontras dan sensitif terhadap pergeseran tingkat keasaman maupun kebiasaan larutan (Halász et al., 2023). Kemudahan isolasi pigmen dan ketiadaan reagen sintetik berbahaya menjadikan kol ungu sangat prospektif untuk diimobilisasi ke substrat kertas indikator sekali pakai yang higienis dan ekonomis.

Kendati potensi bahan alam dan fenomena asidifikasi saliva telah banyak dikaji, integrasi antara biosensor kertas alami dan sistem penglihatan komputer berbasis web belum pernah dioptimalkan untuk skrining awal OSMF. Riset-riset terdahulu masih terkotak-kotak pada analisis ekstraksi laboratorium murni atau aplikasi pengemasan pangan pintar tanpa menjangkau sektor tele-kesehatan (*tele-health*) (Edward et al., 2025; Halász et al., 2023). Padahal, pemanfaatan kamera ponsel cerdas (*smartphone-based colorimetric detection*) yang dipadukan dengan algoritma komputasi awan mampu mengeliminasi galat subjektif penglihatan manusia secara signifikan (Qian et al., 2022). Menjawab celah teknologi tersebut, penelitian ini merancang dan mengevaluasi ARECA Analyzer, yaitu purwarupa strip indikator Ph saliva berbasis ekstrak kol ungu yang terhubung dengan platform web pintar pengolah nilai digital RGB. Inovasi ini ditujukan sebagai sarana pembuktian konsep penapisan awal mandiri yang objektif, non-invasif, dan berbiaya sangat terjangkau guna mendukung upaya preventif kesehatan rongga mulut masyarakat rural.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratoris dan rekayasa perangkat lunak. Rangkaian penelitian dilaksanakan secara terpadu yang meliputi formulasi ekstrak bahan alam, imobilisasi matriks indikator, pengujian analitik larutan penyangga standar, serta integrasi algoritma kolorimetri berbasis web.

1. Alat dan Bahan

Bahan baku yang digunakan meliputi kol ungu segar (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*) varietas lokal sebanyak 100 gram yang diperoleh dari pasar tradisional, akuades pro-analisis, larutan asam asetat encer (CH_3COOH 5%), serbuk natrium bikarbonat murni (NaHCO_3), dan kertas saring selulosa bebas abu Whatman No. 1. Peralatan laboratorium mencakup timbangan analitik digital presisi 0,01 g, penangas air (*water bath*), corong Buchner, gelas piala borosilikat 50 ML dan 250 ML, pipet tetes volumetrik, dan instrumen Ph meter digital terkalibrasi dua titik (Ph 4,01 dan 7,00). Komponen uji komputasi menggunakan kamera ponsel cerdas resolusi 12 megapiksel dengan sensor optik CMOS, *mini lightbox* pencahayaan LED

konstan 5500 K, serta laptop yang menjalankan peramban web modern dengan dukungan antarmuka grafis HTML5 dan JavaScript.

2. Ekstraksi Antosianin dan Fabrikasi Kertas Indikator

Kol ungu dicuci menggunakan air mengalir untuk menghilangkan kotoran fisik, ditiriskan, lalu dirajang halus dengan ukuran sekitar 2×2 mm hingga mencapai bobot tepat 100 gram. Rajangan kol ungu dimasukkan ke dalam gelas piala yang berisi 200 ml akuades (rasio padatan terhadap pelarut 1:2 b/v), kemudian diekstraksi melalui perebusan terkontrol pada suhu 80°C selama 10 menit hingga pelarut berubah menjadi ungu pekat (Edward et al., 2025). Ekstrak kasar didinginkan pada temperatur ruang (25°C) selama 20 menit, lalu disaring menggunakan kertas saring selulosa untuk memisahkan residu ampas tanaman. Kertas saring Whatman No. 1 yang telah dipotong berukuran 1×4 cm direndam sempurna ke dalam filtrat antosianin selama 10 detik hingga warna terserap merata. Seluruh strip indikator kemudian dikeringkan di dalam desikator hampa udara pada temperatur kamar selama 12 jam hingga kering sempurna, lalu disimpan dalam wadah kedap cahaya sebelum digunakan.

3. Preparasi Larutan Ph Standar dan Prosedur Pengujian

Validasi rentang analitik menggunakan empat formulasi larutan penyangga kerja dengan nilai Ph 5,0; 6,0; 7,0; dan 8,0 dengan volume masing-masing 50 ml. Larutan Ph 5 disiapkan melalui penambahan 6 tetes larutan asam asetat 5% ke dalam akuades, sedangkan larutan Ph 6 dibuat dengan menambahkan 2 tetes larutan asam asetat ke dalam volume akuades yang sama. Larutan Ph 7 menggunakan akuades murni netral, sementara kondisi basa Ph 8 dicapai melalui pelarutan 0,10 gram serbuk natrium bikarbonat ke dalam 50 ml akuades. Seluruh larutan diaduk secara konstan selama 20 detik dan nilai Ph aktualnya diverifikasi langsung menggunakan Ph meter digital standar. Pengujian strip dilakukan dengan mencelupkan ujung strip indikator ke dalam masing-masing larutan uji selama 10 detik, ditiriskan, dan didiamkan selama 60 detik agar reaksi kromogenik antosianin mencapai kesetimbangan stabil. Setiap perlakuan Ph diuji dengan pengulangan sebanyak tiga kali (*triplo*, $n = 3$) untuk menjamin reliabilitas dan keterulangan data.

4. Pengambilan Citra Digital dan Arsitektur Sistem ARECA Analyzer

Strip indikator yang telah bereaksi diletakkan mendatar di dalam *mini lightbox* tertutup berlatar belakang putih netral guna mencegah gangguan interferensi cahaya ambien. Perekam citra dilakukan menggunakan kamera ponsel cerdas yang diposisikan tegak lurus tepat di atas strip dengan jarak fokus tetap antara 15 hingga 20 cm tanpa menggunakan lampu kilat (*flash*). Citra uji diunggah ke antarmuka aplikasi web ARECA Analyzer yang dibangun menggunakan arsitektur JavaScript Canvas API. Algoritma program secara otomatis mengekstrak nilai rerata intensitas spektral tiga kanal warna, yaitu *Red* (R), *Green* (G), dan *Blue* (B) pada area deteksi (*region of interest*, ROI) seluas 50×50 piksel. Nilai koordinat RGB tersebut kemudian dipetakan ke fungsi regresi kalibrasi digital untuk menginterpolasi nilai estimasi Ph secara otomatis. Sistem kemudian menampilkan interpretasi stratifikasi risiko kesehatan rongga mulut: Ph 6,5–7,5 dikategorikan sebagai “Normal”, Ph 5,5–6,4 sebagai “Perlu Perhatian”, dan Ph $< 5,5$ sebagai “Berisiko Tinggi”, lengkap dengan anjuran konsultasi klinis ke fasilitas pelayanan kesehatan terdekat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Indikator Kolorimetri ARECA

Pengujian analitik menunjukkan bahwa strip selulosa terimobilisasi ekstrak kol ungu (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*) mampu merespons perbedaan konsentrasi ion

hidrogen secara spesifik. Perubahan spektrum warna tampak jelas secara kasat mata di sepanjang rentang Ph fisiologis saliva 5,0 hingga 8,0. Pengamatan visual membuktikan bahwa peningkatan kebasaaan larutan memicu transisi warna dari spektrum merah jingga menuju spektrum biru kehijauan. Stabilitas transisi warna ini dipengaruhi oleh pergeseran kesetimbangan tautomerik antosianin pada kondisi keasaman medium yang berbeda (Abedi-Firoozjah et al., 2022). Profil respons kromogenik dan parameter kolorimetri digital hasil pengujian *triplo* terangkum dalam uraian tabel berikut.

Tabel 1 menyajikan data visual perubahan warna strip indikator alami serta nilai koordinat digital RGB yang diekstraksi dari kamera optik terkalibrasi pada setiap variasi tingkat Ph larutan uji.

Tabel 1. Hasil Uji Kolorimetri dan Parameter Digital Koordinat RGB Indikator ARECA (n = 3)

Tingkat Aktual	Ph	Warna Visual Strip Indikator	Koordinat Rerata (Red, Green, Blue)	RGB	Interpretasi Kondisi Sistem
5,0		Merah Tua (<i>Dark Red</i>)	(223, 118, 125)		Berisiko Tinggi
6,0		Merah Muda (<i>Pink</i>)	(203, 159, 178)		Perlu Perhatian
7,0		Ungu Netral (<i>Neutral Purple</i>)	(180, 168, 195)		Normal
8,0		Biru Muda (<i>Light Blue</i>)	(116, 173, 194)		Normal / Basa Lemah

Berdasarkan data pada Tabel 1, terlihat korelasi terbalik yang sangat konsisten antara konsentrasi ion H^+ dengan nilai intensitas kanal merah (*Red*). Pada kondisi Ph 5,0, struktur pigmen antosianin didominasi oleh bentuk kation flavilium yang stabil sehingga memantulkan warna merah tua pekat dengan nilai intensitas kanal R tertinggi mencapai 223. Seiring dengan kenaikan Ph menuju kondisi netral 7,0, reaksi deprotonasi menghasilkan pembentukan basa kuinoidal berwarna ungu netral dengan intensitas kanal merah yang tereduksi menjadi 180. Pada suasana basa Ph 8,0, molekul terionisasi lebih lanjut membentuk anion kalkon terhidrolisis yang memberikan pantulan warna biru muda dengan intensitas kanal biru (*Blue*) yang dominan sebesar 194 (Edward et al., 2025; Halász et al., 2023). Pengujian berulang sebanyak tiga kali pada masing-masing titik menghasilkan deviasi nilai RGB dengan koefisien variasi (*coefficient of variation*, CV) di bawah 5%, yang mengonfirmasi bahwa preparasi indikator memiliki presisi analitik yang sangat baik.

Evaluasi kuantitatif terhadap akurasi pembacaan sistem web ARECA Analyzer dilakukan melalui komparasi langsung antara nilai Ph prediksi algoritma digital terhadap pembacaan baku dari instrumen Ph meter digital standar. Pengukuran komparatif ini bertujuan untuk menentukan tingkat keandalan instrumen sebelum diimplementasikan lebih luas ke lingkungan pengguna. Data verifikasi performa analitik tersebut ditampilkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Validasi Kuantitatif dan Uji Akurasi Algoritma Sistem Web ARECA Analyzer

Ph Larutan Standar (Ph Meter)	Estimasi ARECA (Rerata $\pm$ SD)	Ph Sistem	Selisih Absolut (Δ pH)	Akurasi Relatif Sistem (%)
5,00	5,15 $\pm$ 0,05		0,15	97,00
6,00	5,80 $\pm$ 0,06		0,20	96,67
7,00	7,18 $\pm$ 0,04		0,18	97,42
8,00	8,19 $\pm$ 0,05		0,19	97,62

Rata-Rata	—	0,18	97,25
------------------	----------	-------------	--------------

Data pada Tabel 2 mendemonstrasikan bahwa sistem ARECA Analyzer memiliki presisi dan akurasi pengukuran yang memuaskan untuk kategori alat skrining awal non-laboratorium. Nilai galat mutlak rata-rata (*mean absolute error*) yang diperoleh dari empat rentang titik uji adalah sebesar 0,18 unit Ph dengan simpangan baku pengulangan yang sangat sempit ($\pm 0,04$ hingga $\pm 0,06$). Tingkat akurasi relatif sistem secara keseluruhan mencapai rerata 97,25%, yang membuktikan bahwa formulasi algoritma interpolasi polinomial RGB mampu menerjemahkan densitas optik secara akurat (Qian et al., 2022). Capaian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan analisis citra digital terkomputasi sukses meminimalkan galat subjektif persepsi visual manusia saat membaca indikator warna kertas secara manual. Meskipun demikian, selisih pembacaan sebesar 0,18 unit Ph tetap dipengaruhi oleh fluktuasi mikroskopis ketebalan adsorpsi pigmen pada pori-pori kertas saring selulosa selama proses perendaman (Halász et al., 2023).

Hasil analisis performa analitik di atas membuktikan bahwa penurunan nilai Ph hingga level 5,0–6,0 terdeteksi secara konsisten oleh sistem dengan menampilkan status peringatan “Berisiko Tinggi” dan “Perlu Perhatian”. Dalam konteks patofisiologi lesi prakanker mulut, lingkungan mikro rongga mulut pengunyah pinang kronis kerap mengalami asidifikasi akibat akumulasi metabolit asam dan disfungsi dapar saliva (Ghalwash, 2020; Zhang et al., 2022). Penelitian Poimenidou et al. (2025) menegaskan bahwa stres oksidatif yang dipicu oleh radikal bebas secara signifikan menggeser Ph saliva ke rentang yang lebih asam dibandingkan individu sehat yang berada pada rentang fisiologis netral 6,8–7,2. Dengan demikian, kemampuan indikator ARECA dalam mengenali deviasi Ph larutan asam secara presisi memberikan dasar pengujian yang rasional untuk memilah individu yang memerlukan rujukan penanganan klinis lebih lanjut.

Pembahasan

Pengujian analitik strip selulosa terimobilisasi ekstrak kubis ungu membuktikan adanya sensitivitas kromogenik yang sangat spesifik terhadap perubahan derajat keasaman pada rentang Ph fisiologis saliva 5,0 hingga 8,0. Transisi spektrum warna dari merah tua menuju biru muda berkorelasi erat dengan penurunan nilai intensitas kanal merah dari angka 223 pada tingkat Ph 5,0 menjadi 180 pada suasana netral Ph 7,0, serta dominasi intensitas kanal biru sebesar 194 pada suasana basa Ph 8,0. Fenomena pergeseran kromatik tersebut dikendalikan oleh transformasi bentuk kation flavilium menjadi basa kuinoidal hingga pembentukan anion kalkon akibat reaksi deprotonasi molekul antosianin. Pengujian berulang menghasilkan koefisien variasi di bawah 5%, yang menegaskan bahwa preparasi indikator memiliki reproduktibilitas tinggi. Implikasi praktis dari temuan ini menunjukkan bahwa strip kolorimetri alami berpotensi besar dikembangkan sebagai media uji mandiri berbiaya terjangkau bagi masyarakat (AuYoung et al., 2022; Sánchez et al., 2025). Namun demikian, keterbatasan penelitian pada tahap ini bertumpu pada ketiadaan pengujian stabilitas degradasi pigmen antosianin akibat paparan cahaya dan suhu ruang penyimpanan (Ameri et al., 2024; Thanh et al., 2026; Zahari et al., 2025).

Integrasi pembacaan warna strip melalui algoritma interpolasi digital pada sistem komputasi terbukti menunjukkan keandalan analitik yang tinggi dibandingkan pembacaan baku Ph meter laboratorium. Validasi kuantitatif mencatatkan nilai selisih absolut rata-rata sebesar 0,18 unit Ph dengan rentang deviasi dari 0,15 hingga 0,20 di seluruh titik pengujian, serta membukukan akurasi relatif sistem yang sangat konsisten dengan rata-rata mencapai 97,25%. Pemanfaatan ekstraksi koordinat digital sukses meminimalkan galat subjektif persepsi visual



pengamat saat membaca gradasi warna secara kasat mata, sehingga meningkatkan keandalan pengukuran di luar lingkungan laboratorium. Implikasi metodologis dari hasil ini mengonfirmasi bahwa teknologi analisis citra digital dapat mentransformasi indikator berbasis bahan alam menjadi instrumen diagnostik yang terukur. Kendati demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan karena proses pengambilan gambar strip masih sangat bergantung pada kondisi pencahayaan kamera eksternal yang belum terstandarisasi dalam sebuah bilik iluminasi tertutup (McCarty et al., 2025; Rayappa et al., 2026; Schary et al., 2021; Shinde et al., 2026).

Sensitivitas sistem dalam mendeteksi penurunan nilai keasaman saliva pada rentang 5,0 hingga 6,0 memiliki relevansi klinis yang signifikan terhadap pemantauan lingkungan mikro rongga mulut. Asidifikasi saliva kerap terjadi akibat akumulasi metabolit asam, stres oksidatif, serta penurunan fungsi dahar saliva yang sering dialami oleh populasi berisiko seperti pengunyah pinang kronis. Respon visual yang menampilkan peringatan kondisi berisiko tinggi pada tingkat keasaman rendah memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk deteksi dini ketidakseimbangan fisiologis rongga mulut sebelum berkembang menjadi lesi jaringan yang lebih parah. Implikasi kebijakan kesehatan masyarakat mendorong pemanfaatan alat skrining non-invasif berbasis titik perawatan ini untuk memperluas jangkauan pemantauan kesehatan gigi dan mulut di fasilitas kesehatan primer (McRae et al., 2020; Steigmann et al., 2020; Walsh et al., 2021; Warnakulasuriya & Kerr, 2021). Walaupun demikian, keterbatasan analisis ini terletak pada penggunaan larutan saliva artifisial, sehingga belum memetakan interferensi viskositas saliva alami, enzim mulut, maupun sisa partikel makanan terhadap respons warna strip.

Secara menyeluruh, riset ini membuktikan bahwa penggabungan strip kolorimetri antosianin dan algoritma interpolasi digital berhasil menghadirkan perangkat deteksi keasaman saliva yang valid, presisi, serta aplikatif. Sinergi antara kepekaan biokimia bahan alam dan kecepatan pemrosesan data optik terbukti efektif menciptakan metode pemantauan kesehatan saliva secara objektif dan non-invasif. Implikasi teoritis dari penelitian ini memperkuat konsep pemanfaatan bahan biologis terbarukan dalam fabrikasi biosensor terintegrasi teknologi digital. Sementara itu, keterbatasan menyeluruh dari penelitian ini bertumpu pada skala pengujian yang masih berada pada tahap simulasi laboratorium terkontrol tanpa melibatkan sampel saliva klinis dari pasien secara langsung. Oleh karena itu, bagi peneliti selanjutnya disarankan untuk melaksanakan uji klinis menggunakan saliva asli pasien dengan variasi patologi rongga mulut guna mengevaluasi spesifisitas, sensitivitas klinis, serta ketahanan operasional sistem secara komprehensif di lapangan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membuktikan konsep bahwa sistem kolorimetri ARECA Analyzer berbasis ekstrak kubis merah mampu berfungsi efektif dan stabil sebagai indikator alami untuk mendeteksi pergeseran derajat keasaman saliva. Respons kromogenik pada strip selulosa menunjukkan transisi warna yang tegas dan reproduibel, serta terbukti selaras dengan instrumen pengukur standar laboratorium. Pengintegrasian algoritma pengenalan warna pada aplikasi web sukses mengotomatisasi konversi citra menjadi interpretasi keasaman objektif sekaligus menampilkan stratifikasi risiko kesehatan rongga mulut secara instan. Secara praktis, inovasi ini berimplikasi sebagai terobosan teknologi penapisan awal mandiri yang ekonomis, ramah lingkungan (*green chemistry*), dan non-invasif bagi masyarakat pedesaan pengonsumsi biji pinang. Kehadiran piranti digital ini sangat berpotensi memperluas keterjangkauan deteksi dini sebelum timbul komplikasi lanjut lesi prakanker pada fasilitas pelayanan kesehatan primer.

Meskipun menunjukkan performa analitik yang memuaskan, penelitian ini masih terbatas pada validasi *in vitro* menggunakan larutan penyangga buatan serta belum memperhitungkan dinamika viskositas dan enzim saliva manusia seutuhnya. Oleh karena itu, penelitian di masa depan disarankan untuk menguji performa biosensor secara klinis menggunakan sampel saliva asli dari pasien terkonfirmasi *oral submucous fibrosis*. Peneliti lanjutan juga perlu mengevaluasi stabilitas fototermal pigmen antosianin terhadap degradasi lingkungan penyimpanan dan kelembapan udara secara jangka panjang. Selain itu, pengembangan algoritma kompensasi pencahayaan otomatis berbasis kecerdasan buatan (*machine learning*) serta integrasi perangkat pemindai portabel tertutup (*closed-box illumination*) sangat direkomendasikan guna meminimalkan interferensi cahaya sekitar. Langkah penyempurnaan tersebut krusial untuk memastikan keandalan, sensitivitas klinis, serta kepraktisan operasional sistem skrining di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abedi-Firoozjah, R., Yousefi, S., Heydari, M., Seyedfatehi, F., Jafarzadeh, S., Mohammadi, R., Rouhi, M., & Garavand, F. (2022). Application of red cabbage anthocyanins as pH-sensitive pigments in smart food packaging and sensors. *Polymers*, 14(8), Article 1629. <https://doi.org/10.3390/polym14081629>
- Ameri, M., Aji, A., & Kessler, S. (2024). Characterization of a food-safe colorimetric indicator based on black rice anthocyanin/PET films for visual analysis of fish spoilage. *Packaging Technology and Science*, 37(8), 769–780. <https://doi.org/10.1002/pts.2824>
- AuYoung, B., Ravichandran, A. G., Patel, D., Dave, N., Shah, A., Wronko-Stevens, B., Bettencourt, F., Rajan, R., & Menon, N. (2022). A low-cost paper-based device for the colorimetric quantification of bilirubin in serum using smartphone technology. *Frontiers in Chemistry*, 10, Article 869086. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.869086>
- Bisht, S. R., Mishra, P., Yadav, D., Rawal, R., & Mercado-Shekhar, K. P. (2021). Current and emerging techniques for oral cancer screening and diagnosis: A review. *Progress in Biomedical Engineering*, 3(4), Article 042002. <https://doi.org/10.1088/2516-1091/ac2c96>
- Edward, E. G., Rovina, K., Zuldin, W. H., Pindi, W., Mantihal, S., Suriati, L., & Supri, S. (2025). Purple power: Unleashing the vibrant potential of red cabbage anthocyanins in functional food packaging systems. *Food and Bioprocess Technology*, 18(11), 8954–8977. <https://doi.org/10.1007/s11947-025-03995-3>
- Ghalwash, D. M. (2020). Diagnostic and prognostic value of salivary biomarkers in oral cancer and precancer: Review article. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Medicine, and Pathology*, 32(6), 505–514. <https://doi.org/10.1016/j.ajoms.2020.06.013>
- Gupta, R., Ratnu, A., Gupta, S. R., Hadial, H., Singh, L., Singh, P. K., & Singh, S. (2025). Evaluation of noninvasive adjuncts for early detection of oral cancer in oral potentially malignant disorders and development of risk-based management strategies: Protocol for a prospective longitudinal study. *JMIR Research Protocols*, 14, Article e66285. <https://doi.org/10.2196/66285>
- Halász, K., Kóczán, Z., & Joóbné Preklet, E. (2023). pH-dependent color response of cellulose-based time-temperature indicators impregnated with red cabbage extract. *Journal*



- of Food Measurement and Characterization, 17(3), 2555–2565. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-01805-y>
- Kazemi, K., Fadl, A., Sperandio, F. F., & Leask, A. (2025). The areca nut and oral submucosal fibrosis: A narrative review. *Dentistry Journal*, 13(8), Article 364. <https://doi.org/10.3390/dj13080364>
- Kuupiel, D., Bawontuo, V., & Mashamba-Thompson, T. (2017). Improving the accessibility and efficiency of point-of-care diagnostics services in low- and middle-income countries: Lean and agile supply chain management. *Diagnostics*, 7(4), Article 58. <https://doi.org/10.3390/diagnostics7040058>
- McCarty, D. A., Kim, M.-J., Jo, H., Yim, E., Yun, H., Sims, S., Kim, M., & Kwon, S. (2025). Accessible water quality monitoring through hybrid human–machine colorimetric methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(5), Article 555. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13983-x>
- McRae, M. P., Modak, S. S., Simmons, G. W., Trochesset, D., Kerr, A. R., Thornhill, M. H., Redding, S. W., Vigneswaran, N., Kang, S. K., Christodoulides, N., Murdoch, C., Dietl, S. J., Markham, R., & McDevitt, J. T. (2020). Point-of-care oral cytology tool for the screening and assessment of potentially malignant oral lesions. *Cancer Cytopathology*, 128(3), 207–220. <https://doi.org/10.1002/cncy.22236>
- Meci, A., Goyal, N., & Goldenberg, D. (2025). Malignant transformation rate of oral premalignant disorders: A large database analysis. *The Laryngoscope*, 135(10), 3654–3659. <https://doi.org/10.1002/lary.32236>
- Poimenidou, A. A., Geraki, P., Davidopoulou, S., Kalfas, S., & Arhakis, A. (2025). Oxidative stress and salivary physicochemical characteristics relative to dental caries and restorative treatment in children. *Antioxidants*, 14(4), Article 405. <https://doi.org/10.3390/antiox14040405>
- Qian, S., Cui, Y., Cai, Z., & Li, L. (2022). Applications of smartphone-based colorimetric biosensors. *Biosensors and Bioelectronics: X*, 11, Article 100173. <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2022.100173>
- Rayappa, M. K., Flauzino, J. M. R., Grell, M., & Güder, F. (2026). Cellulose-based sensors for decentralized monitoring in precision agriculture. *Nature Communications*, 17(1), Article 1245. <https://doi.org/10.1038/s41467-026-70730-7>
- Sánchez, A. A., Castillo, D., Riofrío-Cabrera, G., Jaramillo, G., & Lakshminarayanan, V. (2025). Paper-based colorimetric pH test strip using bio-derived dyes. *Biosensors*, 15(12), Article 816. <https://doi.org/10.3390/bios15120816>
- Schary, W., Paskali, F., Rentschler, S., Ruppert, C., Wagner, G. E., Steinmetz, I., Deigner, H., & Kohl, M. (2021). *Open-source, adaptable, all-in-one smartphone-based system for quantitative analysis of point-of-care diagnostics*. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1050337/v1>
- Shinde, T., Bhoir, P., Nirmal, J., & Mehendale, N. (2026). The automated paper strip reader (APSR): A reliable low-cost solution for colorimetric detection. *IEEE Journal on Flexible Electronics*, 1, Article 3677153. <https://doi.org/10.1109/jflex.2026.3677153>
- Steigmann, L., Maekawa, S., Sima, C., Travan, S., Wang, C., & Giannobile, W. V. (2020). Biosensor and lab-on-a-chip biomarker-identifying technologies for oral and periodontal diseases. *Frontiers in Pharmacology*, 11, Article 588480. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.588480>



- Thanh, N. C., Nhu, P. N. H., Dat, N. Q., Dong, B. P., Huy, N. T., Duy, N. B. A., & Anh, N. T. (2026). Anthocyanin-based intelligent food packaging films reinforced with ginger pseudostem cellulose fibers: A sustainable approach for real-time freshness monitoring of perishable foods. *RSC Advances*, 16(33), 30563–30581. <https://doi.org/10.1039/d6ra03420a>
- Walsh, T., Warnakulasuriya, S., Lingen, M. W., Kerr, A. R., Ogden, G. R., Glenny, A., & Macey, R. (2021). Clinical assessment for the detection of oral cavity cancer and potentially malignant disorders in apparently healthy adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2021(12), Article CD010173. <https://doi.org/10.1002/14651858.cd010173.pub3>
- Warnakulasuriya, S., & Kerr, A. R. (2021). Oral cancer screening: Past, present, and future. *Journal of Dental Research*, 100(12), 1313–1320. <https://doi.org/10.1177/00220345211014795>
- Zahari, N. S., Sabran, S. F., Asrah, N. M., Bakar, M. F. A., Pa'ee, F., Muhammad, N., Bakar, F. I. A., & Said, M. M. (2025). Antioxidant properties and storage stability of spray-dried *Melastoma malabathricum* L. fruit extract for natural colorant. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 48(1), 115–128. <https://doi.org/10.47836/pjtas.48.1.17>
- Zhang, P., Chua, N. Q. E., Dang, S., Davis, A., Chong, K. W., Prime, S. S., & Cirillo, N. (2022). Molecular mechanisms of malignant transformation of oral submucous fibrosis by different betel quid constituents—Does fibroblast senescence play a role? *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3), Article 1637. <https://doi.org/10.3390/ijms23031637>