

Seleksi Pewarna Indikator pH sebagai Kandidat *Core Dye* Tinta *Thermochromic Food-Grade* untuk Aplikasi *Smart Packaging* Produk Pangan Beku

Selection of pH Indicator Dyes as Core Dye Candidates for Food-Grade Thermochromic Ink in Frozen Food Smart Packaging Applications

**Ulfah Izdihar¹, Elfa Susanti Thamrin^{1*}, Endo Pebri Dani Putra¹, Elsa Windiastuti¹,
Tedy Sylvia¹, Noveliska BR Sembiring¹, Indira Hapsari¹, Radya Yogautami¹**

¹ Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung 35365, Indonesia

* Email: elfa.thamrin@tip.itera.ac.id

Naskah diterima: 22 Desember 2025; Naskah disetujui: 28 Juni 2026

ABSTRACT

Frozen food distribution requires consistent temperature monitoring to maintain product quality and safety throughout the cold supply chain. However, most frozen food packaging lacks effective and safe temperature indicators, while existing technologies often involve hazardous chemicals such as Bisphenol-A (BPA). This study aims to develop a food-grade, BPA-free thermochromic ink based on pH-sensitive leuco dyes as a candidate core dye for food-grade thermochromic ink development. The sensitivity of single and combined pH indicator dyes Bromothymol Blue (BTB), Methyl Red (MR), Bromocresol Purple (BCP), Bromophenol Blue (BPB), and their combinations AB (BTB+MR), CB (BCP+MR), and DBA (BPB+MR+BTB) was evaluated under ammonia gas exposure of approximately 230 ppm for 60 minutes. Dye responses were analyzed using colorimetric parameters L^* , a^* , and b^* , total color difference (ΔE), and pH changes. The results showed that BCP, BTB, and the CB combination exhibited the highest ΔE values, indicating pronounced visual color changes, with BCP demonstrating the fastest and most consistent response from the initial exposure. MR and CB displayed the highest pH responsiveness to ammonia gas, whereas BCP and BTB exhibited greater pH stability. Based on combined colorimetric and pH performance, BCP, MR, and CB were selected as the most promising core dye candidates for thermochromic ink formulation. These findings provide a scientific foundation for the further development and validation of food-grade thermochromic ink formulations for smart packaging applications in frozen food distribution.

Keywords: pH Indicator Dye, Core Dye, Thermochromic Ink, Frozen Food Packaging, Food-grade, Colorimetric.

ABSTRAK

Distribusi produk pangan beku memerlukan pemantauan suhu yang konsisten untuk menjaga mutu dan keamanan produk sepanjang rantai pasok dingin. Namun, sebagian besar kemasan pangan beku belum dilengkapi indikator suhu yang efektif dan aman, sementara teknologi yang tersedia masih berpotensi menimbulkan risiko kesehatan akibat penggunaan bahan kimia berbahaya seperti Bisphenol-A (BPA). Penelitian ini bertujuan mengembangkan tinta termokromik berbasis leuco dye dengan indikator pH yang aman untuk pangan (food-grade) tanpa penggunaan BPA sebagai indikator visual suhu pada kemasan pangan beku. Penelitian dilakukan dengan menguji sensitivitas larutan pewarna

indikator pH tunggal dan kombinasi, yaitu Bromothymol Blue (BTB), Methyl Red (MR), Bromocresol Purple (BCP), Bromophenol Blue (BPB), serta kombinasi AB (BTB+MR), CB (BCP+MR), dan DBA (BPB+MR+BTB), terhadap paparan gas amonia ± 230 ppm selama 60 menit. Respons pewarna dianalisis berdasarkan perubahan warna parameter L^* , a^* , dan b^* , nilai perbedaan warna total (ΔE), serta perubahan pH. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pewarna BCP, BTB, dan kombinasi CB memiliki nilai ΔE tertinggi yang mengindikasikan perubahan warna visual yang signifikan, dengan pewarna BCP menunjukkan respons paling cepat dan konsisten sejak awal paparan. Pewarna MR dan kombinasi CB menunjukkan respons pH paling tinggi terhadap gas amonia, sedangkan BCP dan BTB menunjukkan kestabilan pH yang baik. Berdasarkan hasil tersebut, pewarna BCP, MR, dan kombinasi CB dipilih sebagai kandidat utama untuk formulasi tinta indikator. Penelitian ini menunjukkan potensi pengembangan tinta termokromik food-grade yang aman dan efektif untuk aplikasi kemasan pangan beku.

Kata kunci: Tinta Termochromic, Pewarna Indikator pH, Kemasan Pangan Beku, Food-grade, Kolorimetri, Sensitivitas Amonia

PENDAHULUAN

Keamanan dan mutu produk pangan beku sangat ditentukan oleh keberlangsungan rantai pasok dingin sepanjang tahapan penyimpanan dan distribusi. Produk pangan yang bersifat mudah rusak, seperti daging, ikan, dan produk olahan beku, memerlukan pengendalian suhu yang ketat untuk mencegah percepatan reaksi kimia, perubahan sifat fisik, serta peningkatan aktivitas mikrobiologis yang dapat berdampak pada penurunan kualitas dan keamanan pangan (Montanari, 2008).

Rantai pasok pangan merupakan sistem terintegrasi yang melibatkan berbagai aktor mulai dari produksi hingga konsumsi, sehingga penyimpangan suhu pada salah satu tahapan dapat memengaruhi mutu produk secara keseluruhan. Meskipun sistem pendinginan telah banyak diterapkan dalam pengelolaan rantai pasok dingin, pengawasan suhu secara kontinu masih menghadapi tantangan, antara lain tingginya biaya operasional dan kompleksitas distribusi (Evitha, 2019). Selain itu, informasi mengenai riwayat suhu produk selama distribusi umumnya tidak tersedia secara langsung bagi konsumen, sehingga potensi penyimpangan suhu sulit terdeteksi secara visual pada tingkat kemasan.

Dalam beberapa tahun terakhir, pengembangan *smart packaging* menjadi pendekatan strategis untuk memantau kualitas dan keamanan pangan secara *real-time*. Indikator berbasis warna, khususnya indikator pH dan suhu, banyak dikaji karena mampu memberikan sinyal visual yang mudah diamati tanpa memerlukan perangkat tambahan. Salah satu komponen utama *smart packaging* adalah tinta *thermochromic*. Tinta ini tersusun atas *leuco dye*, *color developer*, dan *solvent*, dengan *core dye* sebagai komponen utama yang menentukan sensitivitas dan kestabilan perubahan warna. Meskipun tinta

thermochromic telah banyak dikembangkan, kajian mengenai pemanfaatan pewarna indikator pH *food-grade* sebagai kandidat *core dye* masih terbatas.

Perlu dicatat bahwa pada tahap penelitian ini, mekanisme *thermochromic* direpresentasikan melalui respons pewarna terhadap perubahan pH akibat paparan gas amonia sebagai proksi kondisi kimia lingkungan. Oleh karena itu, kajian ini berfokus pada seleksi kandidat *core dye* berbasis sensitivitas pH sebelum dilakukan pengujian respons suhu secara langsung. Pemahaman karakteristik awal pewarna termasuk respons terhadap paparan senyawa volatil dan struktur morfologinya sangat penting sebagai landasan ilmiah untuk pengembangan formulasi tinta *thermochromic food-grade* yang aplikatif pada sistem kemasan cerdas produk pangan beku.

Berbagai penelitian melaporkan bahwa indikator pH berbasis film atau sensor kolorimetrik dapat digunakan untuk memantau kesegaran produk pangan melalui perubahan warna yang berkorelasi dengan aktivitas mikroba dan pembentukan senyawa volatil (Chen et al., 2020; Sobhan et al., 2022). Sistem sensor warna berbasis pengukuran parameter CIELAB, seperti $^{\circ}$ Hue dan ΔE , juga terbukti efektif untuk mendeteksi perubahan lingkungan kimia secara kuantitatif dan visual (Kebede Olbemo et al., 2024; Pastore et al., 2020).

Namun demikian, pengembangan indikator warna untuk aplikasi kemasan pangan masih menghadapi sejumlah keterbatasan. Beberapa indikator yang telah dilaporkan menggunakan bahan kimia yang berpotensi bermigrasi ke produk pangan atau mengandung senyawa berisiko, sehingga membatasi aplikasinya pada kemasan primer. Selain itu, indikator berbasis pewarna tunggal sering kali memiliki rentang sensitivitas pH yang sempit dan perubahan warna yang kurang kontras, sehingga sulit dikenali secara visual oleh konsumen. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, beberapa studi menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi pewarna indikator dapat memperluas rentang pH aktif, meningkatkan intensitas warna, serta menghasilkan transisi warna yang lebih linear dan sensitif dibandingkan pewarna tunggal (Pastore et al., 2020; Yao & Byrne, 2001; Yang et al., 2023).

Meskipun penelitian mengenai film indikator pH telah banyak dilakukan, kajian yang secara sistematis mengevaluasi sensitivitas warna, karakteristik perubahan pH, serta morfologi pewarna indikator sebagai *core dye* dalam formulasi awal tinta *thermochromic food-grade* masih terbatas. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan *smart packaging food-grade* berbasis indikator untuk monitoring mutu pangan beku. Oleh karena itu, kajian eksploratif pada tahap awal formulasi pewarna indikator menjadi aspek kebaruan ilmiah yang penting dalam pengembangan tinta *thermochromic* untuk *smart packaging*.

Berdasarkan hal tersebut, permasalahan utama dalam penelitian ini adalah belum teridentifikasinya pewarna indikator pH tunggal maupun kombinasi yang memiliki sensitivitas warna tinggi, respons pH yang jelas, serta karakteristik morfologi yang sesuai untuk diaplikasikan sebagai kandidat *core dye* pada tinta *thermochromic* yang aman pangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi sensitivitas dan karakteristik pewarna indikator pH tunggal dan kombinasi melalui analisis perubahan warna berbasis parameter CIELAB (chroma, °Hue, dan ΔE), pengukuran perubahan pH akibat paparan gas amonia, serta karakterisasi morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) sebagai dasar pengembangan tinta *thermochromic food-grade* untuk aplikasi *smart packaging* produk pangan beku.

METODE PENELITIAN

Pengujian sensitivitas pewarna indikator dilakukan dengan terlebih dahulu menyiapkan larutan pewarna indikator pH. Larutan indikator pH dibuat dari pewarna *Bromothymol Blue* (BTB), *Methyl Red* (MR), *Bromocresol Green* (BCG), *Phenol Red* (PR), *Bromophenol Blue* (BPB), *Bromocresol Purple* (BCP), kombinasi BTB+MR, kombinasi BCG+BTB+PR, kombinasi BPB+MR+BTB, kombinasi BCG+BCP, dan kombinasi BCP+MR. Masing-masing pewarna tunggal ditimbang sebanyak 0,04 g, kemudian dilarutkan dalam 100 mL etanol 40% hingga terbentuk larutan homogen. Untuk larutan kombinasi, komposisinya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Larutan Pewarna Kombinasi

Kombinasi Warna	Pewarna 1	Pewarna 2	Pewarna 3
BTB + MR	8 ml	12 ml	-
BCG + BCP	8 ml	12 ml	-
BCP + MR	8 ml	12 ml	-
BCG + BTB + PR	2,4 ml	3,6 ml	14 ml
BPB + MR + BTB	2,4 ml	3,6 ml	14 ml

Larutan pewarna indikator selanjutnya diuji sensitivitasnya terhadap gas amonia yang merepresentasikan hasil degradasi udang selama penyimpanan. Pengujian dilakukan melalui simulasi uap NH_3 yang dihasilkan dari penguapan larutan NH_4OH dalam wadah kaca tertutup, dengan memodifikasi metode yang dikembangkan oleh Riyanto et al. (2014). Sebanyak 10 mL larutan NH_4OH 1 N dan 10 mL masing-masing larutan pewarna indikator ditempatkan secara bersamaan dalam satu toples kaca kedap udara.

Parameter yang diamati meliputi perubahan warna dan perubahan pH larutan indikator pada menit ke-60 setelah terpapar gas amonia. Pewarna indikator pH yang

menunjukkan respons signifikan terhadap paparan gas amonia selanjutnya dipilih dan digunakan sebagai bahan pewarna (*dye*) dalam formulasi tinta termokromik.

Pengukuran Warna (CIELAB)

Pengukuran warna dilakukan menggunakan *colorimeter* HunterLab ColorFlex EZ dengan sistem pengukuran CIELAB. Setiap sampel diukur pada tiga titik ulangan dan nilai rata-rata digunakan untuk analisis. Pengukuran dilakukan terhadap larutan pewarna sebelum ($t=0$) dan setelah paparan gas amonia selama 60 menit ($t=60$). Parameter yang direkam meliputi L^* , a^* , b^* , nilai *Chroma*, $^{\circ}$ Hue, dan ΔE . Nilai ΔE dihitung menggunakan rumus: $\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*{}^2 + \Delta a^*{}^2 + \Delta b^*{}^2)}$, dengan larutan pewarna sebelum paparan sebagai warna referensi.

Pengukuran pH

Nilai pH larutan pewarna diukur menggunakan pH meter Thermo Scientific Orion Star A111 yang telah dikalibrasi menggunakan larutan buffer standar pH 4,0 dan pH 7,0 sebelum digunakan. Pengukuran pH dilakukan pada kondisi awal ($t=0$, sebelum paparan) dan setelah paparan gas amonia selama 60 menit ($t=60$) untuk memperoleh data perubahan pH (ΔpH) masing-masing pewarna.

Karakterisasi SEM

Karakterisasi morfologi permukaan pewarna indikator dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) di Pusat Laboratorium Forensik (Puslabfor) Sentul. Sampel pewarna yang dianalisis meliputi *Methyl Red* (MR), *Bromocresol Purple* (BCP), dan kombinasi MR+BCP yang telah dipilih berdasarkan hasil pengujian sensitivitas terhadap gas amonia. Sebelum pengamatan, sampel pewarna dalam bentuk padatan kering dipreparasi di atas *stub* aluminium dan dilapisi dengan lapisan konduktif tipis melalui proses *gold coating* menggunakan *sputter coater* untuk mencegah akumulasi muatan listrik pada permukaan sampel. Pengamatan morfologi dilakukan pada perbesaran $1.000\times$ untuk memperoleh gambaran struktur permukaan dan karakteristik porositas masing-masing pewarna.

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain *Bromothymol Blue* (BTB), *Methyl Red* (MR), *Bromocresol Green* (BCG), *Phenol Red* (PR), *Bromophenol*

Blue (BPB), *Bromocresol Purple* (BCP), etanol Merck 40%, aquades, dan NH_4OH Merck 25%.

Alat

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini meliputi ruang asam, toples kaca vakum, timbangan analitik Sartorius BSA224S-CW, ketelitian 0,0001 g], *magnetic stirrer* Scilogex MS7-H550-Pro, *colorimeter* HunterLab ColorFlex EZ, pH meter Thermo Scientific Orion Star A111, *Scanning Electron Microscope* (SEM), dan peralatan gelas lainnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

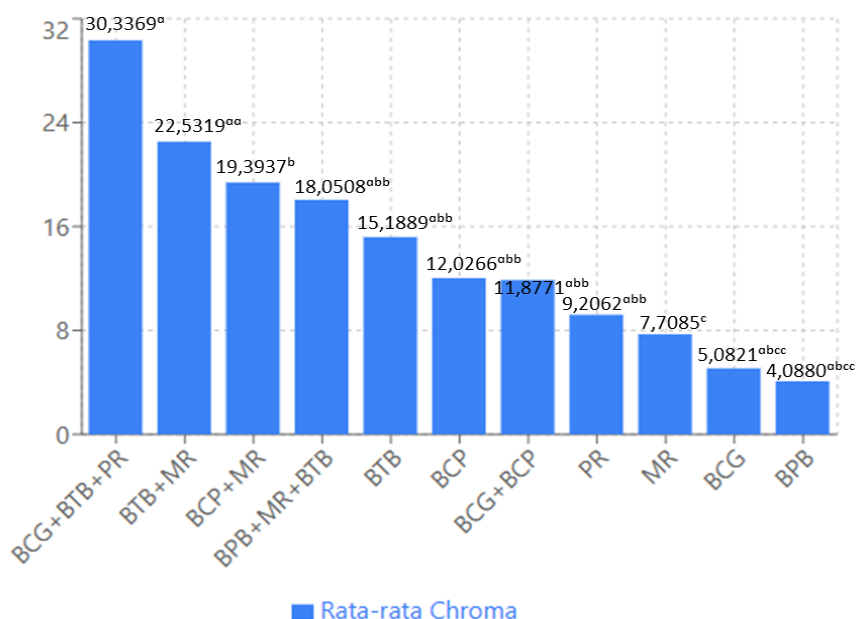
Uji Sensitivitas Amonia pada Larutan Pewarna Indikator

Pengujian sensitivitas terhadap gas amonia dilakukan pada 6 pewarna indikator pH tunggal, yaitu *Bromothymol Blue* (BTB), *Methyl Red* (MR), *Bromocresol Purple* (BCP), *Bromophenol Blue* (BPB), *Bromocresol Green* (BCG), dan *Phenol Red* (PR), serta lima kombinasi pewarna yang dirancang untuk memperluas rentang sensitivitas dan meningkatkan respons perubahan warna. Kombinasi yang digunakan meliputi BTB-MR (AB), BCP-MR (CB), BPB-MR-BTB (DBA), BCG-BTB-PR (EAF), dan BCG-BCP (EC). Perbedaan komposisi pewarna menghasilkan respons warna yang beragam setelah paparan gas amonia, yang tercermin dari nilai chroma, °Hue, dan ΔE . Kombinasi pewarna menunjukkan perubahan warna yang lebih jelas dibandingkan pewarna tunggal, mengindikasikan bahwa penggabungan dua atau lebih indikator mampu memperluas rentang transisi warna dan meningkatkan sensitivitas terhadap perubahan kondisi kimia akibat paparan ammonia.

Analisa Warna Larutan Pewarna terhadap Paparan Gas Amonia

Analisa warna CIELAB dianalisa menggunakan *colorimeter* yang menunjukkan nilai L^* (nilai terang dan gelap), a^* (nilai merah dan hijau), b^* (nilai kuning dan biru), nilai chroma (nilai cerah dan kusam), °Hue (definisi warna), dan ΔE (total perbedaan warna). Pandiselvam et al. (2023) menjelaskan bahwa nilai chroma menggambarkan intensitas variasi hue dibandingkan dengan warna abu-abu dengan kecerahan tertentu; semakin tinggi nilai chroma, semakin tinggi intensitas warna sampel yang dipersepsikan oleh manusia. Chroma merupakan salah satu atribut penting dalam sistem pengukuran warna yang digunakan untuk mengkarakterisasi kualitas warna produk pangan. Hasil analisa nilai

chroma disajikan pada Gambar 1.



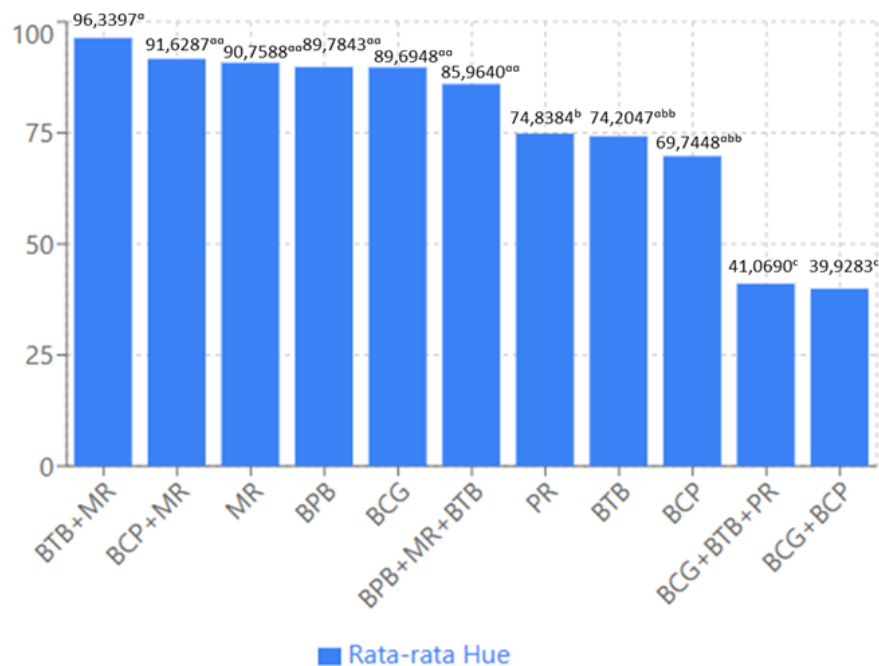
Gambar 1. Nilai chroma larutan pewarna indikator setelah paparan gas ammonia (± 230 ppm, 60 menit)

Keterangan: Angka menunjukkan rata-rata. Angka rata-rata yang diikuti huruf yang berbeda menunjukkan adanya perbedaan yang nyata secara statistik (DMRT $\alpha=0,05$)

Berdasarkan hasil analisis ANOVA, perlakuan pewarna menunjukkan pengaruh yang sangat nyata terhadap nilai chroma ($F\text{-hitung} > F\text{-tabel } 0,05$). Hal ini mengindikasikan bahwa jenis pewarna yang digunakan, baik tunggal maupun kombinasi, memberikan perbedaan intensitas warna yang signifikan secara statistik. Hasil uji lanjut Duncan menunjukkan bahwa perlakuan BCG+BTB+PR (EAF) menghasilkan nilai chroma tertinggi, yang menandakan intensitas warna paling kuat. Sistem *colorimeter* seperti HunterLab dan CIELAB adalah sistem yang umum digunakan dalam industri pangan untuk mengukur derajat kecerahan, kemerahan atau kehijauan, dan kekuningan atau kebiruan. Pewarna kombinasi cenderung menghasilkan nilai chroma yang lebih tinggi dibandingkan pewarna tunggal, menunjukkan efek sinergis dalam meningkatkan saturasi warna.

Analisa warna selanjutnya yaitu $^{\circ}\text{Hue}$ yang dideskripsikan Rulaningtyas et al. (2015) sebagai indikator yang dinyatakan dalam derajat: 0° (merah), 60° (kuning), 120° (hijau), 180° (cyan), 240° (biru), dan 300° (magenta). Nilai $^{\circ}\text{Hue}$ sangat penting dalam konteks pewarna indikator pH, karena mencerminkan perubahan warna yang terjadi pada rentang pH tertentu. *Bromothymol blue* (BTB) memiliki rentang indikasi aktif dari pH 6,0 hingga 7,6 dengan bentuk terprotonasi berwarna kuning dan bentuk terdeprotonasi berwarna biru. Hubungan antara nilai $^{\circ}\text{Hue}$ dan pH menunjukkan bahwa perubahan pH

akibat paparan gas amonia diikuti oleh perubahan warna pada larutan indikator. Peningkatan pH menyebabkan terjadinya pergeseran nilai °Hue yang merefleksikan perubahan struktur molekul indikator akibat proses protonasi dan deprotonasi. Nilai °Hue versus pH dapat digunakan untuk pengukuran pH dengan sensor kolorimetrik, dimana penambahan pewarna kedua dapat meningkatkan sensitivitas secara bertahap dengan nilai °Hue linear (Olbemo et al., 2024). Oleh karena itu, analisis hubungan °Hue dan pH memberikan dasar ilmiah dalam pemilihan kandidat *core dye* untuk pengembangan tinta indikator berbasis perubahan warna.

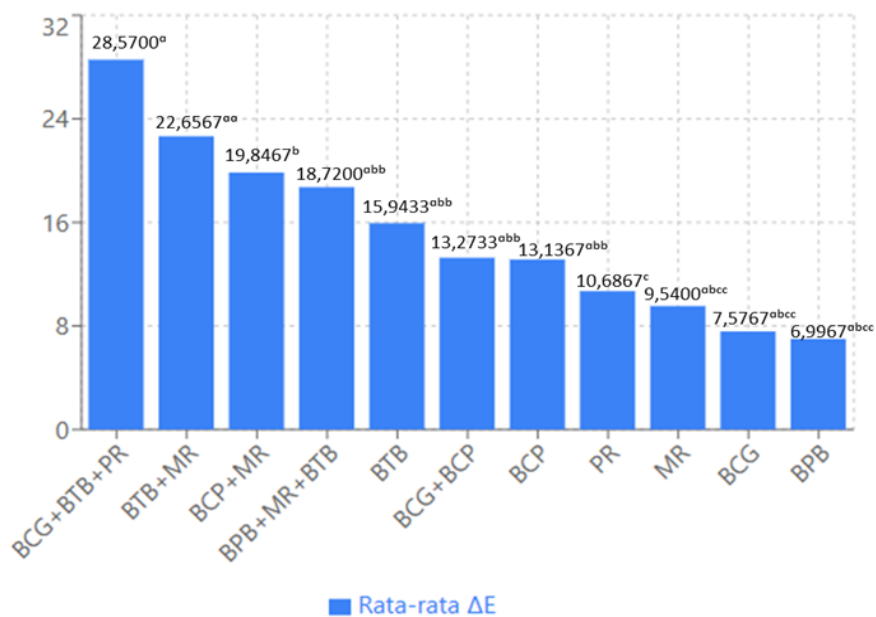


Gambar 2. Nilai °hue larutan pewarna indikator setelah paparan gas ammonia (± 230 ppm, 60 menit)
 Keterangan: Angka menunjukkan rata-rata. Angka rata-rata yang diikuti huruf yang berbeda menunjukkan adanya perbedaan yang nyata secara statistik (DMRT $\alpha=0,05$)

Gambar 2 menunjukkan bahwa perlakuan pewarna memberikan pengaruh yang sangat nyata terhadap nilai °Hue ($F\text{-hitung} > F\text{-tabel } 0,05$). Perbedaan nilai hue antar perlakuan menunjukkan bahwa setiap pewarna atau kombinasi pewarna menghasilkan karakteristik warna yang berbeda dalam spektrum warna. Perlakuan BCG+BTB+PR (EAF) menunjukkan nilai °Hue terendah (sekitar $28,97^\circ$ – $48,91^\circ$), yang menunjukkan warna cenderung ke arah merah-oranye. Sementara itu, perlakuan seperti MR dan BCP+MR (CB) menunjukkan nilai °Hue tinggi ($>90^\circ$), menandakan warna cenderung ke arah kuning-hijau. Hubungan antara °Hue dan pH dapat digunakan untuk pengawasan pH secara kontinu pada produk pangan (Pastore et al., 2020). Perbedaan nilai °Hue yang signifikan antara perlakuan menunjukkan bahwa setiap pewarna atau kombinasi pewarna memiliki

karakteristik transisi warna yang unik pada rentang pH tertentu. Hal ini sangat penting dalam pemilihan pewarna untuk aplikasi tinta *thermochromic* sebagai indikator pH dalam sistem pangan atau kemasan pintar (*smart packaging*).

Nilai total perbedaan warna yang biasa disimbolkan dengan ΔE merupakan ukuran perbedaan warna yang mewakili jarak antara dua sampel warna dan dapat mengkuantifikasi kesamaan dua warna. Delta E adalah angka tunggal yang mewakili jarak antara dua warna, dimana nilai ΔE 1,0 adalah perbedaan warna terkecil yang dapat dilihat oleh mata manusia. ΔE dihitung dari perbedaan dalam kecerahan (ΔL^*), perbedaan pada sumbu merah/hijau (Δa^*), dan perbedaan pada sumbu kuning/biru (Δb^*).



Gambar 3. Nilai ΔE larutan pewarna indikator setelah paparan gas ammonia (± 230 ppm, 60 menit)
 Keterangan: Angka menunjukkan rata-rata. Angka rata-rata yang diikuti huruf yang berbeda menunjukkan adanya perbedaan yang nyata secara statistik (DMRT $\alpha=0,05$)

Gambar 3 menunjukkan bahwa perlakuan pewarna memberikan pengaruh sangat nyata terhadap nilai ΔE ($F\text{-hitung} > F\text{-tabel } 0,05$). Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan warna yang dihasilkan oleh berbagai perlakuan pewarna dapat dibedakan secara signifikan dari warna referensi (standar putih). Hasil uji Duncan menunjukkan bahwa perlakuan BCG+BTB+PR (EAF) menghasilkan nilai ΔE tertinggi (hingga 41,51), menandakan perbedaan warna yang sangat besar dari standar referensi. Sementara itu, pewarna seperti BPB, BCG, dan MR menghasilkan nilai ΔE yang lebih rendah (< 12), menunjukkan perbedaan warna yang lebih kecil dari referensi. Nilai ΔE yang tinggi pada pewarna kombinasi menunjukkan potensi yang baik untuk aplikasi yang memerlukan perubahan warna yang mudah terdeteksi, seperti dalam sistem kemasan pintar untuk menunjukkan

kesegaran produk pangan. Perubahan warna dengan nilai ΔE hingga 9,66 menunjukkan perubahan yang terdeteksi secara visual. Dalam konteks penelitian ini, pewarna dengan nilai ΔE yang berbeda-beda dapat dipilih sesuai dengan kebutuhan aplikasi spesifik dalam industri pangan.

Nilai pH pada Rentang Waktu Paparan Gas Amonia

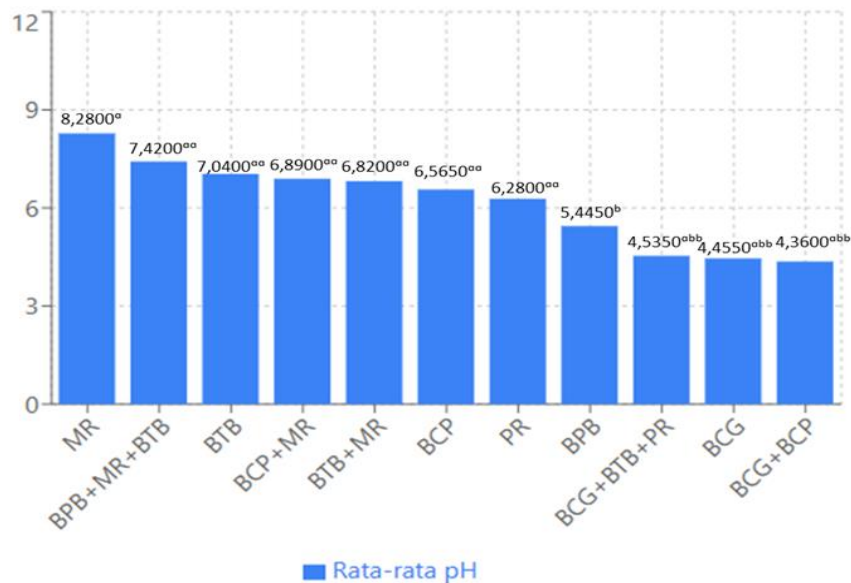
Sebelum paparan gas amonia, nilai pH awal ($t=0$) masing-masing larutan pewarna indikator menunjukkan keragaman yang mencerminkan sifat kimia masing-masing pewarna dalam pelarut etanol 40%. Pewarna tunggal BTB menunjukkan pH awal paling rendah yaitu 1,68, jauh di bawah rentang pH aktifnya (6,0–7,6), yang mengindikasikan bahwa dalam pelarut etanol 40% BTB berada dalam kondisi terprotonasi penuh sehingga berwarna kuning sebelum paparan. Pewarna MR memiliki pH awal 4,02 yang berada dalam rentang transisi aktifnya (4,4–6,2), sementara BCG, PR, BPB, dan BCP masing-masing menunjukkan pH awal 3,11; 3,19; 3,27; dan 3,30 — seluruhnya berada di bawah rentang pH aktif masing-masing pewarna, menandakan kondisi terprotonasi di mana pewarna cenderung menampilkan warna bentuk asamnya.

Pada larutan kombinasi, nilai pH awal yang terukur adalah BTB+MR sebesar 3,46; BCG+BTB+PR sebesar 3,18; BPB+MR+BTB sebesar 3,41; BCG+BCP sebesar 3,41; dan BCP+MR sebesar 3,56. Nilai pH awal kombinasi pewarna cenderung lebih tinggi dibandingkan sebagian besar pewarna tunggalnya, yang diduga akibat interaksi antar gugus fungsional pewarna dalam larutan. Seluruh nilai pH awal ini menjadi *baseline* penting untuk menginterpretasikan besaran perubahan pH (ΔpH) setelah paparan gas amonia, mengingat setiap pewarna memiliki rentang pH aktif yang berbeda di mana transisi warna berlangsung.

Nilai pH adalah ukuran keasaman atau kebasaan suatu larutan yang merepresentasikan konsentrasi ion hidrogen. Dalam konteks pewarna indikator, pH sangat penting karena menentukan perubahan warna yang terjadi. Setiap pewarna indikator memiliki rentang pH aktif yang spesifik dimana perubahan warna yang signifikan dapat diamati. Pewarna indikator yang digunakan dalam penelitian ini memiliki rentang pH aktif yang berbeda-beda: *Bromothymol Blue* (BTB) memiliki rentang indikasi aktif dari pH 6,0 hingga 7,6, dimana bentuk terprotonasi berwarna kuning dan bentuk terdeprotonasi berwarna biru. BTB sangat berguna untuk mengukur substansi dengan pH relatif netral (sekitar 7). *Methyl Red* (MR) merupakan pewarna indikator yang berwarna merah pada pH di bawah 4,4 dan kuning pada pH di atas 6,2, dengan rentang transisi pH 4,4–6,2.

Bromocresol Green (BCG) merupakan pewarna triphenylmethane dengan pK_a 4,8,

berubah dari kuning (bentuk terprotonasi) pada pH asam menjadi biru-hijau (bentuk terdeprotonasi) pada pH basa, dengan rentang transisi pH 3,8–5,4. Pewarna *Phenol Red* (PR) adalah indikator dengan rentang pH 6,8–8,4, berubah dari kuning pada pH asam menjadi merah pada pH basa. Indikator warna *Bromophenol Blue* (BPB) memiliki rentang pH 3,0–4,6, berubah dari kuning menjadi biru seiring peningkatan pH dari asam ke basa. Sedangkan *Bromocresol Purple* (BCP) berwarna kuning di bawah pH 5,2 dan violet di atas pH 6,8, dengan nilai pKa 6,3.



Gambar 4. Nilai pH larutan pewarna indikator setelah paparan gas ammonia (± 230 ppm, 60 menit)
 Keterangan: Angka menunjukkan rata-rata. Angka rata-rata yang diikuti huruf yang berbeda menunjukkan adanya perbedaan yang nyata secara statistik (DMRT $\alpha=0,05$)

Berdasarkan hasil analisis ANOVA pada Gambar 4, perlakuan pewarna menunjukkan pengaruh yang sangat nyata terhadap nilai pH larutan ($F\text{-hitung} > F\text{-tabel}$ 0,05). Hal ini menunjukkan bahwa setiap jenis pewarna, baik tunggal maupun kombinasi, menghasilkan kondisi pH yang berbeda secara signifikan dalam medium yang sama. Hasil uji lanjut Duncan menunjukkan pengelompokan pewarna berdasarkan nilai pH yang dihasilkan. Pewarna seperti MR dan BPB+MR+BTB (DBA) cenderung menghasilkan pH yang lebih tinggi (basa), sedangkan pewarna seperti BCG dan BCG+BCP (EC) menghasilkan pH yang lebih rendah (asam). Perbedaan nilai pH ini berkaitan erat dengan sifat kimia masing-masing pewarna dan kemampuannya untuk menerima atau melepaskan proton dalam larutan.

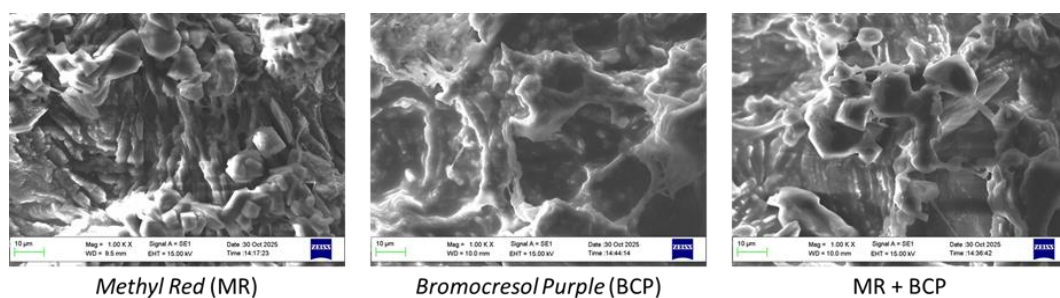
Menurut Olbemo et al. (2024), nilai °Hue versus pH dapat digunakan untuk pengukuran pH dengan sensor kolorimetrik karena penambahan pewarna kedua dapat meningkatkan sensitivitas secara bertahap dengan nilai °Hue linear. Kombinasi pewarna

seperti *bromocresol green* dan *bromocresol purple* telah terbukti berguna karena variasi rasio kedua pewarna tersebut mengubah pH sehingga warna berubah dari biru ke hijau ke kuning (Yao & Byrne, 2001). Yang et al. (2023) menjelaskan bahwa pewarna campuran pH dapat memberikan respons yang lebih sensitif dan rentang pH yang lebih luas dibandingkan pewarna tunggal. Hal ini sangat penting untuk aplikasi dalam kemasan cerdas (*smart packaging*) yang memerlukan deteksi perubahan pH yang akurat untuk monitoring kesegaran produk pangan (Chen et al., 2020).

Indikator pH dapat membantu konsumen mengidentifikasi kesegaran makanan kemasan melalui perubahan warna pada bahan kemasan, yang mudah terlihat dengan mata telanjang tanpa perlu membuka kemasan (Sobhan et al., 2022). Hal ini melindungi kepentingan konsumen dan mengurangi pemborosan makanan. Nilai pH lingkungan kimia untuk makanan dapat berubah akibat kerusakan mikroba (Chen et al., 2020). Ketika makanan disimpan, diangkut, atau didistribusikan, indikator pH dapat digunakan untuk memonitor kondisi pH-nya dan memberikan informasi tentang kualitasnya.

Analisa SEM (Scanning Electron Microscopy)

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan teknik yang sangat efektif untuk mengkarakterisasi morfologi permukaan material pada skala mikro dan nano, memberikan informasi tentang struktur partikel termasuk morfologi, komposisi, dan orientasinya. Berdasarkan pengujian sensitivitas pewarna indikator terhadap paparan gas amonia, pewarna indikator MR, BCP, dan kombinasi MR+BCP (CB) dipilih untuk digunakan dalam formulasi awal *thermochromic leuco dye*. Tahap awal ini dilakukan analisa SEM untuk melihat morfologi struktur *core dye* dari *thermochromic leuco dye*. Hasil pengujian SEM dari 3 pewarna indikator disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Morfologi Permukaan Core Dye Hasil Analisis SEM pada Perbesaran 1.000x (a) Methyl Red (MR), (b) Bromocresol Purple (BCP), (c) Kombinasi MR+BCP (CB)

Berdasarkan Gambar 5, pewarna *methyl red* menunjukkan struktur permukaan yang sangat porous dan kasar dengan tekstur yang tidak seragam. Morfologi permukaan

menampilkan formasi seperti bunga karang (*coral-like*) atau spons dengan banyak celah, rongga, dan struktur berlapis yang saling tumpang tindih. Permukaan memiliki karakteristik topografi yang sangat bergelombang dengan ketinggian permukaan yang bervariasi secara signifikan. Pewarna *methyl red* memiliki tingkat porositas yang tinggi yang menyebabkan luas permukaan spesifik yang besar, meningkatkan aksesibilitas molekul H^+/OH^- , berpotensi meningkatkan kecepatan respons namun dapat mengurangi stabilitas mekanik.

Hasil SEM pada *bromocresol purple* menunjukkan permukaan dengan tekstur yang lebih padat namun tetap heterogen, dengan karakteristik permukaan yang menampilkan kombinasi antara area yang relatif halus dengan struktur partikel berbentuk bulat (*spherical*) dan *elipsoid*. Terdapat formasi seperti butiran-butiran yang tersebar di permukaan dengan beberapa struktur berlapis di area tertentu. Tingkat porositas *bromocresol purple* tergolong sedang sehingga seimbang antara sensitivitas dan stabilitas mekanik. Pewarna kombinasi MR+BCP memiliki morfologi permukaan yang sangat berbeda dari kedua sampel tunggalnya, dengan struktur yang lebih padat dan lebih terorganisasi. Permukaan didominasi oleh struktur berlapis yang lebih besar dan lebih teratur dengan orientasi yang lebih seragam. Terdapat juga area yang menunjukkan agregasi partikel dengan ukuran yang lebih besar. Tingkat porositas yang rendah menunjukkan permukaan lebih padat, meningkatkan durabilitas namun dapat memperlambat respons.

Berdasarkan analisis morfologi dari ketiga pewarna, masing-masing dapat digunakan sesuai kebutuhan aplikasi spesifik. Jika ingin melakukan deteksi yang cepat, dapat menggunakan pewarna MR karena porositas tinggi dan luas permukaan besar memungkinkan difusi ion yang cepat, namun memiliki stabilitas mekanik dan durabilitas lebih rendah. Aplikasi monitoring jangka panjang dapat menggunakan kombinasi pewarna MR+BCP karena struktur padat dan terorganisir memberikan stabilitas lebih baik. Selain itu, kombinasi pewarna MR+BCP memiliki reproduktibilitas tinggi dan *resistance* terhadap degradasi. Sedangkan untuk aplikasi performa yang seimbang dapat menggunakan pewarna BCP yang dapat diaplikasikan pada *smart packaging* untuk produk pangan yang memiliki *shelf life* menengah.

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa jenis pewarna indikator pH, baik tunggal maupun kombinasi, berpengaruh signifikan terhadap respons warna dan perubahan pH

akibat paparan gas amonia. Pewarna kombinasi secara umum menghasilkan nilai chroma dan ΔE yang lebih tinggi dibandingkan pewarna tunggal, menandakan perubahan warna yang lebih intens dan mudah terdeteksi secara visual. Kombinasi *Bromocresol Green–Bromothymol Blue–Phenol Red* (EAF) menunjukkan performa terbaik dari sisi intensitas dan perbedaan warna, sehingga berpotensi diaplikasikan sebagai indikator visual pada sistem kemasan cerdas.

Analisis nilai °Hue dan pH menunjukkan bahwa setiap pewarna memiliki karakteristik transisi warna yang spesifik, dan kombinasi pewarna mampu memperluas rentang sensitivitas pH serta meningkatkan ketajaman respons warna. Karakterisasi SEM menunjukkan perbedaan morfologi yang signifikan antar pewarna: *methyl red* memiliki struktur sangat porous yang mendukung respons cepat, sementara kombinasi *methyl red–bromocresol purple* menunjukkan struktur lebih padat dan terorganisir yang mengindikasikan stabilitas dan durabilitas lebih baik.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini mengidentifikasi pewarna indikator pH potensial sebagai kandidat *core dye* dalam formulasi awal tinta *thermochromic food-grade* berdasarkan karakteristik respons warna, perubahan pH, dan morfologi. Temuan ini menjadi dasar penelitian lanjutan untuk mengembangkan dan memvalidasi kinerja tinta *thermochromic* sebagai indikator pada sistem *smart packaging* pangan beku.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Sumatera (ITERA) atas dukungan pendanaan yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan, baik secara finansial maupun non-finansial, yang dapat mempengaruhi hasil dan interpretasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, H., Zhang, M., Bhandari, B. and Yang, C. (2020) 'Novel pH-sensitive films containing curcumin and anthocyanins to monitor fish freshness', *Food Hydrocolloids*, 100, pp. 105438. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105438>

- Evitha, Y. (2018) 'Tantangan industri cold supply chain produk makanan beku', *Jurnal Logistik Indonesia*, 2(2), pp. 25–28. <https://doi.org/10.31334/jli.v2i2.295>
- Kebede Olbemo, S., Takeuchi, M. and Tanaka, H. (2024) 'Digital-movie-based flow colorimetry for pH measurement with universal indicators', *Talanta Open*, 9, pp. 100279. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2023.100279>
- Montanari, R. (2008) 'Cold chain tracking: a managerial perspective', *Trends in Food Science & Technology*, 19(8), pp. 425–431. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.03.009>
- Pandiselvam, R., Mitharwal, S., Rani, P., Shanker, M. A., Kumar, A., Aslam, R. & Khaneghah, A. M. (2023) 'The influence of non-thermal technologies on color pigments of food materials: An updated review', *Current Research in Food Science*, 6, pp. 100529.
- Pastore, A., Badocco, D., Cappellin, L. and Pastore, P. (2020) 'Enhancement of the pH measurement of a PVDF-supported colorimetric sensor by tailoring hue changes with the addition of a second dye', *Microchemical Journal*, 154, pp. 104552. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104552>
- Rulaningtyas, R., Suksmono, A. B., Mengko, T. L., & Saptawati, G. P. (2015) 'Segmentasi citra berwarna dengan menggunakan metode clustering berbasis patch untuk identifikasi mycobacterium tuberculosis', *Jurnal Biosains Pascasarjana*, 17(1), pp. 19–25.
- Sobhan, A., Muthukumarappan, K. and Wei, L. (2022) 'A biopolymer-based pH indicator film for visually monitoring beef and fish spoilage', *Food Bioscience*, 46, pp. 101523. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101523>
- Yang, D., Liu, Q., Zeng, X., Chen, X., Li, M., Wu, X., Liu, Y., Zheng, Y., Xiang, J., Wang, C. and Weng, W. (2023) 'Novel pH-responsive indicator films based on bromothymol blue-anchored chitin for shrimp freshness monitoring', *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, p. 127052.
- Yao, W. and Byrne, R.H. (2001) 'Spectrophotometric determination of freshwater pH using bromocresol purple and phenol red', *Environmental Science & Technology*, 35(6), pp. 1197–1201.