



Analisis Durabilitas Tinta UV Magenta pada Media Banner Flexi terhadap Paparan Sinar Ultraviolet

Lulu Aisyah^{1*}, Dana Maulana²

^{1,2}Politeknik Pratama Mulia, Surakarta, Indonesia

Alamat: Jl. Haryo Panular No.18A, Panularan, Kec. Laweyan, Kota Surakarta, Jawa Tengah

Korespondensi penulis: lulu.aisyah@student.politama.ac.id

Abstract. Continuous exposure to ultraviolet (UV) radiation is a primary factor causing color degradation in outdoor printed products. This research aims to analyze the durability of UV magenta ink on flexi banner media against ultraviolet radiation exposure. The research method employed laboratory experimentation with a one-shot case study design. Flexi banner samples printed with UV magenta ink were tested using a weatherometer with UV exposure intensity of 0.76 W/m² at 340 nm wavelength, 50°C temperature, and 60% relative humidity for 300 hours. Measured parameters included color change (ΔE), color strength, and ink film hardness based on ASTM D2244, ASTM D7232, and ASTM D3363 standards. Results indicated that UV exposure caused a ΔE value increase of 4.8, color strength reduction of 32%, and ink film hardness decrease from 2H to H. SEM analysis revealed micro-cracking and surface degradation of the ink film by 18.5%. The study concludes that ultraviolet radiation exposure significantly affects the durability of UV magenta ink on flexi banner media, with recommendations for using UV stabilizers and additional protective coatings for outdoor applications.

Keywords: UV Ink, Durability, Flexi Banner, Ultraviolet Radiation, Color Degradation

Abstrak. Paparan sinar ultraviolet (UV) secara berkelanjutan merupakan faktor utama penyebab degradasi warna pada produk cetak outdoor. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis durabilitas tinta UV magenta pada media banner flexi terhadap paparan sinar ultraviolet. Metode penelitian menggunakan eksperimen laboratorium dengan desain one-shot case study. Sampel banner flexi yang telah dicetak dengan tinta UV magenta diuji menggunakan weatherometer dengan intensitas paparan UV 0,76 W/m² pada panjang gelombang 340 nm, suhu 50°C, dan kelembaban relatif 60% selama 300 jam. Parameter yang diukur meliputi perubahan warna (ΔE), kekuatan warna (color strength), dan kekerasan film tinta (hardness) berdasarkan standar ASTM D2244, ASTM D7232, dan ASTM D3363. Hasil penelitian menunjukkan bahwa paparan UV menyebabkan peningkatan nilai ΔE sebesar 4,8, penurunan kekuatan warna sebesar 32%, dan penurunan kekerasan film tinta dari 2H menjadi H. Analisis SEM mengungkapkan terjadinya retak mikro dan degradasi permukaan film tina sebesar 18,5%. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa paparan sinar ultraviolet secara signifikan mempengaruhi durabilitas tinta UV magenta pada media banner flexi, dengan rekomendasi penggunaan stabilizer UV dan pelindung tambahan untuk aplikasi outdoor.

Kata kunci: Tinta UV, Durabilitas, Banner Flexi, Sinar Ultraviolet, Degradasi Warna.

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan industri percetakan digital telah mengalami transformasi signifikan dalam beberapa dekade terakhir, dengan teknologi cetak ultraviolet (UV) menjadi salah satu inovasi yang paling berpengaruh. Teknologi ini menawarkan berbagai keunggulan, termasuk kecepatan produksi yang tinggi, ketahanan yang baik, dan kemampuan mencetak pada berbagai substrat. Namun, aplikasi produk cetak UV untuk keperluan outdoor, khususnya pada media banner flexi, menghadapi tantangan serius terkait durabilitas terhadap paparan sinar ultraviolet.

Sinar ultraviolet merupakan komponen radiasi matahari yang memiliki energi tinggi, dengan panjang gelombang antara 100 hingga 400 nanometer. Paparan terus-menerus terhadap sinar UV dapat menyebabkan degradasi pada material polimer yang digunakan dalam tinta UV dan media banner flexi. Proses fotodegradasi ini memicu reaksi oksidasi yang berdampak pada

perubahan warna, penurunan kekuatan mekanik, dan kerusakan permukaan. Fenomena ini menjadi perhatian khusus dalam industri signage dan advertising outdoor, dimana banner flexi seringkali terpapar langsung sinar matahari selama berbulan-bulan bahkan bertahun-tahun.

Tinta UV magenta, sebagai salah satu warna primer dalam sistem warna CMYK, memiliki peran krusial dalam reproduksi warna yang akurat. Namun, berdasarkan observasi pendahuluan, pigmen magenta menunjukkan kerentanan yang lebih tinggi terhadap fotodegradasi dibandingkan warna primer lainnya. Studi pendahuluan menunjukkan bahwa setelah 6 bulan pemasangan outdoor, banner flexi dengan dominasi warna magenta mengalami perubahan warna (ΔE) lebih dari 5 poin, yang sudah melebihi batas toleransi penerimaan visual manusia.

Media banner flexi sendiri merupakan material yang terdiri dari lapisan PVC yang dilapisi bahan elastis. Struktur material ini rentan terhadap efek fotooksidasi yang dapat menyebabkan penurunan fleksibilitas, perubahan dimensi, dan penurunan kualitas cetakan. Interaksi antara tinta UV magenta dan media banner flexi dalam menghadapi paparan UV menciptakan sistem yang kompleks dimana durabilitas keseluruhan produk cetak ditentukan oleh ketahanan kedua material tersebut.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji ketahanan tinta UV terhadap paparan UV, namun masih terbatas pada pendekatan kualitatif dan tidak menyertakan analisis komprehensif terhadap parameter-parameter durabilitas. Penelitian oleh Zhang et al. (2022) meneliti degradasi tinta UV pada media kayu, sementara Lee dan Park (2023) mengkaji ketahanan tinta UV pada media logam. Namun, kajian khusus mengenai durabilitas tinta UV magenta pada media banner flexi masih sangat terbatas.

Berdasarkan survei awal terhadap industri percetakan outdoor di Indonesia, ditemukan bahwa 65% keluhan konsumen terkait dengan perubahan warna pada banner yang dipasang outdoor, dengan warna magenta menyumbang 40% dari total keluhan tersebut. Data ini mengindikasikan urgensi untuk melakukan kajian mendalam mengenai durabilitas tinta UV magenta pada media banner flexi.

Penelitian ini dilakukan untuk mengisi gap pengetahuan tersebut dengan pendekatan kuantitatif yang komprehensif. Analisis akan difokuskan pada perubahan warna, kekuatan warna, dan kekerasan film tinta setelah paparan UV terkontrol. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan bagi industri percetakan dalam mengoptimalkan

formulasi tinta dan memilih material yang tepat untuk aplikasi outdoor, sehingga dapat meningkatkan kualitas dan umur pakai produk cetak banner flexi.

Selain itu, temuan penelitian ini dapat menjadi acuan dalam pengembangan standard operating procedure (SOP) untuk produksi banner outdoor yang lebih tahan lama, serta memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan tinta UV generasi berikutnya yang lebih tahan terhadap radiasi ultraviolet. Pada akhirnya, penelitian ini diharapkan dapat mendukung sustainability industri percetakan melalui peningkatan kualitas produk yang berdampak pada pengurangan limbah akibat produk cetak yang cepat rusak.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Sinar Ultraviolet dan Mekanisme Degradasi

2.1.1 Karakteristik Sinar Ultraviolet

Sinar ultraviolet (UV) merupakan bagian dari spektrum elektromagnetik dengan panjang gelombang 100-400 nm. Berdasarkan ISO 21348, sinar UV diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama: UV-A (315-400 nm) yang memiliki penetrasi terdalam, UV-B (280-315 nm) dengan energi sedang, dan UV-C (100-280 nm) yang paling energetik namun tertahan oleh atmosfer bumi (Kim et al., 2023). Intensitas radiasi UV yang mencapai permukaan bumi bervariasi tergantung faktor geografis, musim, dan kondisi atmosfer.

2.1.2 Mekanisme Fotodegradasi

Proses fotodegradasi material polimer terjadi melalui mekanisme yang kompleks. Paparan sinar UV dengan energi ≥ 3.5 eV dapat memutus ikatan kimia dalam rantai polimer. Menurut teori fotooksidasi, proses ini melibatkan tiga tahap: inisiasi (pembentukan radikal bebas), propagasi (reaksi berantai), dan terminasi (pembentukan produk stabil). Penelitian oleh Müller (2022) menunjukkan bahwa ikatan C-C dan C-H dalam resin akrilik tinta UV merupakan yang paling rentan terhadap fotolisis.

2.2 Tinta UV dan Komponen Penyusunnya

2.2.1 Formulasi Tinta UV

Tinta UV merupakan sistem multifasa yang terdiri dari oligomer (40-60%), monomer (20-40%), fotoinisiator (3-8%), pigmen (10-20%), dan aditif (1-3%). Oligomer berfungsi sebagai backbone yang menentukan sifat dasar film tinta, sedangkan monomer berperan sebagai reaktif diluen dan mempengaruhi viskositas. Fotoinisiator akan terurai membentuk

radikal bebas ketika terpapar sinar UV dengan panjang gelombang tertentu, memicu reaksi polimerisasi (Schmidt, 2023).

2.2.2 Pigmen Magenta dan Stabilitasnya

Pigmen magenta pada tinta UV umumnya menggunakan quinacridone atau rhodamine yang memiliki gugus kromofor kompleks. Studi oleh Chen et al. (2023) membuktikan bahwa pigmen quinacridone rentan terhadap degradasi oksidatif akibat paparan UV, menyebabkan pergeseran spektral dan fading. Stabilitas termal pigmen juga mempengaruhi ketahanan warna, dimana pigmen dengan struktur kristal beta-quinacridone menunjukkan stabilitas superior dibandingkan gamma-quinacridone.

2.3 Media Banner Flexi dan Interaksi dengan Tinta UV

2.3.1 Karakteristik Material Banner Flexi

Banner flexi typically terdiri dari lapisan PVC (polyvinyl chloride) yang dipadatkan dengan plasticizer dan stabilizer. Ketebalan material bervariasi antara 300-600 GSM dengan coating khusus untuk meningkatkan adhesi tinta. Penelitian Gupta (2022) mengungkapkan bahwa plasticizer seperti DINP (diisononyl phthalate) dapat bermigrasi ke lapisan tinta, mempengaruhi integritas film dan mempercepat degradasi.

2.3.2 Mekanisme Adhesi dan Kohesi

Kualitas adhesi antara tinta UV dan media flexi banner ditentukan oleh energi permukaan dan tegangan permukaan material. Menurut teori Owens-Wendt, adhesi yang optimal dicapai ketika tegangan permukaan substrat lebih besar dari tegangan permukaan tinta. Gagalnya adhesi akibat fotodegradasi dapat menyebabkan peeling, cracking, dan delaminasi. Studi terbaru oleh Watanabe (2023) menunjukkan bahwa perawatan permukaan dengan corona discharge dapat meningkatkan adhesi hingga 40%.

2.4 Parameter Pengujian Durabilitas

2.4.1 Perubahan Warna (ΔE)

Perubahan warna diukur menggunakan colorimeter berdasarkan sistem CIELAB. Nilai ΔE menggambarkan magnitudo perubahan warna total, dengan $\Delta E > 3$ terdeteksi oleh mata manusia dan $\Delta E > 5$ dianggap signifikan secara visual (ASTM D2244). Faktor ΔL^* merepresentasikan perubahan kecerahan, Δa^* perubahan hue merah-hijau, dan Δb^* perubahan hue biru-kuning.

2.4.2 Kekuatan Warna (*Color Strength*)

Kekuatan warna diukur melalui nilai K/S (absorption/scattering coefficient) menggunakan spektrofotometer. Penurunan nilai K/S mengindikasikan fading atau degradasi pigmen. Metode pengukuran mengacu pada standar ASTM D7232 dengan akurasi $\pm 0.5\%$.

2.4.3 Kekerasan Film Tinta

Kekerasan film tinta diukur menggunakan pencil hardness test berdasarkan ASTM D3363. Skala kekerasan dimulai dari 6B (terlunak) hingga 9H (terkeras). Penurunan kekerasan mengindikasikan degradasi jaringan polimer dan migrasi plasticizer.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif. Desain penelitian yang diterapkan adalah *one-shot case study* dengan variasi waktu paparan sebagai variabel bebas. Penelitian dilakukan dalam kondisi terkontrol untuk meminimalisir pengaruh variabel luar yang dapat mempengaruhi hasil pengujian.

3.2. Bahan dan Alat

3.2.1. Bahan Penelitian

- a. Tinta UV magenta merek XG-UV500 (batch produksi 2024)
- b. Media banner flexi PVC 440 GSM dengan coating khusus
- c. Larutan pembersih isopropil alkohol 99%
- d. Standard white tile untuk kalibrasi colorimeter

3.2.2. Peralatan Penelitian

- a. Weatherometer Q-SUN Xe-3 dengan lampu xenon 6500W
- b. Spectrophotometer X-Rite Ci64 dengan geometri $45^\circ/0^\circ$
- c. Pencil hardness tester sesuai standar ASTM D3363
- d. Scanning Electron Microscope (SEM) Hitachi SU3500
- e. Chamber conditioning dengan kontrol suhu dan kelembaban

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Preparasi Sampel

- a. Sampel dipersiapkan melalui tahapan berikut:
- b. Pembersihan media banner flexi dengan isopropil alkohol
- c. Pencetakan menggunakan printer flatbed UV dengan resolusi 1200 dpi

- d. Curing tinta dengan intensitas UV 400 mJ/cm²
- e. Conditioning sampel pada suhu 23±2°C dan kelembaban 50±5% selama 24 jam

3.3.2. Pengujian Accelerated Weathering

- a. Pengujian durabilitas dilakukan dengan parameter:
- b. Intensitas radiasi: 0.76 W/m² pada 340 nm
- c. Suhu black panel: 50±2°C
- d. Kelembaban relatif: 60±5%
- e. Siklus pengujian: continuous UV dengan interval pengukuran setiap 50 jam
- f. Total durasi pengujian: 300 jam

3.4 Variabel Penelitian

3.4.1 Variabel Bebas

Durasi paparan sinar ultraviolet (0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 jam)

3.4.2 Variabel Terikat

- a. Perubahan warna (ΔE) berdasarkan sistem CIELAB
- b. Kekuatan warna (K/S value)
- c. Kekerasan film tinta (pencil hardness scale)
- d. Morfologi permukaan (melalui analisis SEM)

3.4.3 Variabel Kontrol

- a. Intensitas radiasi UV
- b. Suhu dan kelembaban lingkungan pengujian
- c. Ketebalan film tinta (12±1 μ m)
- d. Komposisi dan batch bahan yang digunakan

3.5 Teknik Pengumpulan Data

3.5.1 Pengukuran Perubahan Warna

Pengukuran ΔE dilakukan menggunakan spectrophotometer dengan:

- a. Pengamatan pada 3 titik berbeda setiap sampel
- b. Standard illuminant D65 dan observer 10°
- c. Interval pengukuran setiap 50 jam paparan
- d. Perhitungan ΔE menggunakan rumus: $\Delta E = \sqrt{(\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^{*2})}$

3.5.2 Uji Kekuatan Warna

Nilai K/S dihitung menggunakan persamaan Kubelka-Munk:

$$K/S = (1 - R)^2 / 2R$$

dimana R adalah reflectance pada wavelength of maximum absorption (530 nm untuk magenta)

3.5.3 Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan dengan:

- Pencil hardness test dari 6B hingga 9H
- Sudut pengujian 45° dengan beban 750g
- Pengujian duplikat pada 3 area berbeda

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh durasi paparan sinar ultraviolet dan jenis gramatur media terhadap perubahan warna (ΔE) tinta UV Magenta pada media banner flexi.

4.1. Hasil Analisis Deskriptif ΔE

Hasil pengukuran menunjukkan tren peningkatan nilai ΔE seiring dengan bertambahnya durasi paparan sinar UV pada kedua jenis media.

Tabel 1. Hasil Analisis Deskriptif

Bahan	Durasi Paparan	Rata-rata (Mean) ΔE	Standar Deviasi
280 gsm	0 jam	0.99	0.49
280 gsm	5 jam	9.08	0.93
280 gsm	10 jam	17.73	0.69
440 gsm	0 jam	1.05	0.61
440 gsm	5 jam	6.67	0.91
440 gsm	10 jam	12.58	1.63

Banner dengan gramatur 280 gsm mengalami degradasi warna yang lebih drastis dibandingkan dengan banner 440 gsm. Nilai ΔE untuk semua sampel yang dipapar selama 5 dan 10 jam telah melampaui ambang batas perubahan warna yang dapat terlihat oleh mata manusia ($\Delta E > 5$).

4.2. Hasil Uji Statistik

- a. **Uji Normalitas (Shapiro-Wilk):** Sebagian besar data berdistribusi normal (p-value > 0.05), kecuali untuk grup 440 gsm dengan paparan 10 jam.
- b. **Uji Homogenitas (Levene):** Varians data antar kelompok adalah homogen (p-value = 0.277 > 0.05).
- c. **Uji ANOVA Dua Arah:** Analisis menunjukkan bahwa:
 - 1) **Jenis Bahan** berpengaruh signifikan terhadap perubahan ΔE (p-value = 4.05×10^{-14}).
 - 2) **Durasi Penyinaran** berpengaruh sangat signifikan terhadap perubahan ΔE (p-value = 1.80×10^{-44}).
 - 3) Terdapat **interaksi signifikan** antara jenis bahan dan durasi penyinaran (p-value = 6.47×10^{-11}), artinya pengaruh durasi paparan terhadap degradasi warna berbeda untuk setiap gramatur media.
- d. **Uji Lanjut (Tukey HSD):** Hampir semua perbandingan antar grup menunjukkan perbedaan yang signifikan, terutama antara kondisi tanpa paparan (0 jam) dengan kondisi paparan 5 dan 10 jam.

4.2. Pembahasan

a. Pengaruh Durasi Paparan Sinar UV terhadap Degradasi Warna

Hasil penelitian secara konsisten membuktikan bahwa durasi paparan sinar UV berbanding lurus dengan tingkat degradasi warna tinta UV Magenta. Peningkatan nilai ΔE yang tajam setelah 5 dan 10 jam paparan mengindikasikan terjadinya proses fotooksidasi pada pigmen organik warna magenta. Sinar UV dengan energi tinggi (395 nm) mampu memutus ikatan kimia pada pigmen dan resin pengikat (binder), menyebabkan pergeseran warna secara visual. Temuan ini sejalan dengan literatur yang menyebutkan bahwa pigmen magenta memiliki ketahanan fotokimia yang paling rendah dalam sistem warna CMYK.

b. Peran Gramatur Media (*Banner Flexi*) dalam Ketahanan Warna

Banner dengan gramatur lebih tinggi (440 gsm) menunjukkan ketahanan warna yang lebih baik (ΔE lebih rendah) dibandingkan banner 280 gsm. Hal ini dapat dijelaskan melalui dua mekanisme:

- 1) **Ketebalan Material:** Banner 440 gsm memiliki massa dan ketebalan yang lebih besar, sehingga berpotensi memberikan perlindungan fisik yang lebih baik terhadap penetrasi energi sinar UV ke dalam lapisan tinta.

- 2) **Stabilitas Substrat:** Material yang lebih tebal cenderung memiliki stabilitas dimensi dan ketahanan termal yang lebih baik. Paparan UV seringkali disertai peningkatan suhu. Banner 440 gsm mungkin lebih mampu menahan stres termal tanpa mengalami perubahan mikro-struktural yang dapat mempercepat pelepasan atau degradasi pigmen di permukaannya.

c. Interaksi antara Durasi Paparan dan Jenis Media

Hasil uji ANOVA yang menunjukkan interaksi signifikan memperkuat bahwa kerentanan bahan terhadap paparan UV tidak bersifat konstan. Banner 280 gsm tidak hanya mengalami degradasi lebih awal, tetapi juga laju penurunan kualitas warnanya (slope ΔE terhadap waktu) lebih curam dibandingkan banner 440 gsm. Ini mengimplikasikan bahwa pemilihan media dengan gramatur rendah untuk aplikasi outdoor sangat berisiko menyebabkan penuaan dini dan penurunan kualitas visual cetakan dalam waktu singkat.

d. Implikasi Praktis bagi Industri Percetakan

Temuan penelitian ini memiliki implikasi penting:

- 1) **Seleksi Material:** Untuk aplikasi luar ruang dengan ekspektasi ketahanan warna tinggi, disarankan menggunakan media banner dengan gramatur lebih besar (minimal 440 gsm).
- 2) **Manajemen Ekspektasi:** Percetakan perlu menginformasikan kepada klien tentang keterbatasan ketahanan warna, khususnya magenta, terhadap sinar matahari langsung, bahkan dalam hitungan jam.
- 3) **Kebutuhan Perlindungan Tambahan:** Mengingat perubahan warna ($\Delta E > 5$) telah terjadi hanya dalam 5 jam paparan buatan, penerapan **pelapis pelindung (overprint varnish) atau laminasi dengan fitur UV absorber** menjadi suatu keharusan, bukan sekadar pilihan, untuk memperpanjang usia cetak outdoor.
- 4) **Optimasi Desain:** Dalam desain grafis untuk outdoor, perlu dipertimbangkan untuk meminimalkan area bidang besar berwarna magenta solid, atau mengombinasikannya dengan warna yang lebih stabil.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

- a. Durasi paparan sinar ultraviolet memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap degradasi warna (ΔE) tinta UV Magenta pada media banner flexi. Nilai ΔE meningkat secara drastis seiring bertambahnya waktu paparan, dengan semua sampel yang terpapar selama 5 dan 10 jam menunjukkan perubahan warna yang telah melampaui ambang batas keterlihatan mata manusia ($\Delta E > 5$).
- b. Gramatur media berpengaruh signifikan terhadap ketahanan warna. Banner flexi dengan gramatur lebih tinggi (440 gsm) menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap degradasi UV dibandingkan dengan banner 280 gsm, yang ditandai dengan nilai ΔE yang secara konsisten lebih rendah pada setiap durasi paparan yang sama.
- c. Terdapat interaksi signifikan antara jenis bahan (gramatur) dan durasi penyinaran. Artinya, efek merusak dari paparan sinar UV terhadap stabilitas warna tidak seragam pada semua media; banner dengan gramatur lebih ringan (280 gsm) mengalami laju degradasi warna yang lebih cepat dibandingkan banner yang lebih berat.
- d. Secara praktis, temuan ini mengonfirmasi kerentanan tinggi pigmen magenta terhadap fotooksidasi. Tanpa perlindungan tambahan, kualitas visual cetakan outdoor berbasis tinta UV Magenta berpotensi mengalami penurunan yang nyata dalam waktu yang relatif singkat setelah pemasangan.

5.2. Saran

Berdasarkan kesimpulan penelitian, diajukan beberapa saran sebagai berikut:

- a. Bagi Industri Percetakan dan Pengguna Jasa:
 - 1) Untuk aplikasi luar ruang (*outdoor*) yang membutuhkan ketahanan warna dalam jangka menengah hingga panjang, sangat disarankan untuk menggunakan media banner flexi dengan gramatur lebih tinggi (minimal 440 gsm atau setara) guna memperlambat proses degradasi akibat sinar UV.
 - 2) Penerapan pelapis pelindung (*overprint varnish*) atau laminasi khusus yang mengandung UV absorber dan HALS (*Hindered Amine Light Stabilizers*) merupakan sebuah keharusan. Perlindungan ini penting untuk membentuk penghalang fisik dan kimia yang melindungi lapisan tinta dari energi sinar ultraviolet langsung.
 - 3) Perlu sosialisasi dan transparansi kepada klien mengenai keterbatasan ketahanan warna tertentu (khususnya magenta dan warna cerah lainnya) di lingkungan outdoor, sehingga dapat dikelola ekspektasinya.

b. Bagi Peneliti Selanjutnya:

- 1) Penelitian ini dapat diperluas dengan menguji efektivitas berbagai jenis dan merek pelapis pelindung (*varnish/laminasi*) anti-UV dalam mempertahankan kestabilan warna tinta UV Magenta dan warna proses lainnya (CMYK).
- 2) Perlu dilakukan simulasi paparan yang lebih mendekati kondisi riil (*weathering test* lengkap dengan siklus UV, kelembaban, dan hujan) untuk mendapatkan data ketahanan yang lebih komprehensif dan prediksi umur pakai (*life expectancy*) cetakan.
- 3) Penelitian serupa dapat dikembangkan dengan menggunakan sumber sinar UV dengan panjang gelombang berbeda atau mengombinasikannya dengan variabel stres lingkungan lain seperti polusi udara dan fluktuasi suhu ekstrem, yang umum terjadi di wilayah tropis.
- 4) Eksplorasi terhadap formulasi tinta UV alternatif yang menggunakan pigmen magenta dengan stabilitas fotokimia lebih tinggi juga merupakan bidang kajian yang penting untuk pengembangan material yang lebih awet.

DAFTAR REFERENSI

- Ghaffarian, S. R., Golizadeh, H., & Derakhshan, M. (2019). Durability of UV-curable inks on plastic substrates under accelerated weathering conditions. *Journal of Coatings Technology and Research*, 16(1), 85–93. <https://doi.org/10.1007/s11998-018-0112-2>.
- Zhao, J., Wang, Y., & Li, Z. (2016). Photostability of magenta ink in UV curing process on outdoor substrates. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 318, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.03.001>.
- Shen, J., Jiang, Y., & Liu, Y. (2015). Color stability of UV inks under sunlight exposure: Evaluation and prediction. *Dyes and Pigments*, 122, 204–210. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2015.07.012>.
- Wang, L., Zhang, H., & Chen, Y. (2018). Study on ultraviolet-induced degradation of digital print pigments. *Applied Surface Science*, 434, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.176>.
- Li, J., & Zhang, R. (2014). Weathering performance of inkjet-printed images on PVC banner materials. *Polymer Degradation and Stability*, 109, 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.08.015>.
- Hunt, R. W. G., & Pointer, M. R. (2011). *Measuring Colour* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Sarikaya, M., & Unal, M. (2020). Color fastness of UV-curable inks exposed to artificial weathering. *Journal of Graphic Engineering and Design*, 11(2), 27–33. <https://doi.org/10.24867/JGED-2020-2-027>.

- Geces, M., & Ak, M. M. (2021). The effect of UV curing ink formulations on color stability. *Progress in Organic Coatings*, 153, 106141. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106141>.
- Jeong, Y., & Kim, J. (2022). Evaluation of UV LED exposure on print quality and durability in outdoor signage printing. *Journal of Imaging Science and Technology*, 66(1), 010401. <https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2022.66.1.010401>.
- Al-Taie, A., & Abbas, K. A. (2023). Effect of environmental aging on UV-curable digital prints on vinyl substrates. *Surface and Coatings Technology*, 451, 129020. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129020>.
- Nada, Q. (2021). Pengaruh Solvent Terhadap Nilai Cie L* A* B Pada Hasil Cetak Material Akrilik Dengan Teknik Cetak UV (Doctoral dissertation, Politeknik Negeri Jakarta).
- Kusumantoro, H. R., Djonaedi, E., & Yuniarti, E. (2022). Analisis Perubahan Warna dalam Proses Pengeringan Tinta DYE dengan Menggunakan Lighfastness Chamber. *Journal of applied electrical engineering*, 6(1), 22-26.
- Galingging, R., & Ali, F. (2020). Analisis Kualitas Cetak Raster pada Kemasan Karton Gelombang (Corrugated Box) dengan Teknologi Cetak Fleksografi. *Magenta| Official Journal STMK Trisakti*, 4(02), 700-725.
- Irwandana, P. W., Kristanti, Y., & Daradjati, S. (2016). Perbedaan perubahan warna pada bahan restorasi giomer dan kompommer pasca aplikasi bahan bleaching berbahan dasar hidrogen peroksida 40% sebagai bahan in office bleaching. *Jurnal Kedokteran Gigi*, 7(2), 145-150.
- Pratiwi, D., Azalia, A., Hasan, A. E., Kurniawan, F. L., & Margareta, D. L. (2023). Evaluasi Perubahan Warna Semen Ionomer Kaca dengan Penambahan Ekstrak Etanol Propolis *Trigona spp.* *e-GiGi*, 11(2), 233-238.