

Optimalisasi Komposisi Bio-Ink Berbasis Ekstrak Bunga Telang (*Clitoria ternatea*) dan Gum Arabic Terhadap Capaian Warna Cyan pada Aplikasi Inkjet Printing

Salsabila^{1*}, Heribertus Rudi Kusumantoro² & Yoga Putra Pratama³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Grafika & Penerbitan/Politeknik Negeri Jakarta

*Email: salsabila.tgp21@mhs.wpnj.ac.id

ABSTRACT

The digital printing industry currently faces environmental challenges due to the use of synthetic inks containing hazardous chemical compounds. This study aims to optimize the composition of bio-ink based on butterfly pea flower extract (*Clitoria ternatea*) and gum arabic as an environmentally friendly alternative for cyan ink in inkjet printing applications. The research method used varying concentrations of butterfly pea flower extract (1%, 3%, 5%, and 7%) and gum arabic (1%, 2%, 3%, and 4%) with testing parameters of pH, viscosity, and color analysis using the CIE Lab system and Delta E (ΔE) evaluation. The results showed that all formulations produced pH in the range of 5.3-6.6, suitable for inkjet printing applications. Viscosity values ranged from 7.57-9.35 mPa.s, meeting technical standards for inkjet ink (2-10 mPa.s). Color analysis showed that the formulation of 7% butterfly pea flower with 2% gum arabic produced the lowest ΔE value (14.55), indicating the highest similarity to commercial cyan ink. Statistical analysis confirmed that butterfly pea flower concentration significantly influenced pH and color accuracy (p -value < 0.05). This research successfully developed sustainable bio-ink with physicochemical characteristics approaching commercial ink standards, contributing to the development of environmentally friendly printing industry.

Keywords: Bio-ink, Butterfly Pea Flower, Gum Arabic, Inkjet Printing, CIE Lab, Delta E

PENDAHULUAN

Industri percetakan digital mengalami pertumbuhan signifikan dalam dekade terakhir, dengan teknologi inkjet printing menjadi salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk berbagai aplikasi komersial dan domestic. Namun, tinta sintesis konvensional yang digunakan dalam sistem inkjet printing umumnya mengandung senyawa kimia berbahaya dan tidak ramah lingkungan, seperti pewarna azo dan pelarut organik volatil yang dapat mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia [1], [2]. Meningkatnya kesadaran akan dampak lingkungan telah mendorong Pengembangan alternatif yang lebih berkelanjutan, termasuk penggunaan bio-ink dari sumber alami.

Bio-ink merupakan tinta yang diformulasikan menggunakan bahan-bahan organik dan *biodegradable*, yang menawarkan solusi ramah lingkungan untuk industri percetakan. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa ekstrak tumbuhan dapat dimanfaatkan sebagai sumber pewarna alami untuk aplikasi printing, dengan berbagai keunggulan seperti biodegradabilitas, toksisitas rendah, dan sustainability [3], [4], [5], [6], [7]. Beberapa penelitian telah mengeksplorasi penggunaan ekstrak buah, sayuran, dan bunga sebagai pewarna alami untuk aplikasi tekstil dan printing [8], [9], [10], [11], [12].

Bunga telang (*Clitoria Ternatea*) merupakan salah satu sumber pewarna alami yang menarik perhatian karena kandungan antosianin nya yang tinggi. Antosianin dalam bunga telang, khususnya ternatin, memberikan warna biru yang khas dan memiliki stabilitas yang relatif baik [8], [13], [14]. Warna biru dari bunga telang berpotensi untuk dikembangkan menjadi warna cyan dalam proses printing komersial. Cyan merupakan salah satu warna primer yang sangat penting dalam reproduksi warna digital dan sering menjadi tantangan dalam pengembangan pewarna alami akibat adanya keterbatasan sumber pigmen biru alami yang stabil.

Pengembangan bio-ink tidak hanya bergantung pada sumber pewarna, tetapi juga pada formulasi yang tepat untuk memenuhi persyaratan teknis printing. Gum arabic (*Acacia Senegal*) telah banyak digunakan sebagai bahan pengental dan thickening agent dalam formulasi tinta karena

sifat rheologisnya yang baik dan kompatibilitasnya dengan berbagai sistem printing [15]. Kombinasi ekstrak bunga telang sebagai sumber warna dengan gum arabic sebagai bahan pengental diharapkan dapat menghasilkan bio-ink dengan karakteristik yang sesuai untuk aplikasi inkjet printing. Meskipun beberapa penelitian telah mengeksplorasi penggunaan bunga telang sebagai pewarna alami, aplikasinya dalam formulasi bio-ink untuk inkjet printing masih terbatas. Penelitian sebelumnya yang ada umumnya fokus pada aplikasi tekstil atau makanan, dengan sedikit perhatian pada karakteristik teknis yang diperlukan untuk printing digital. Parameter penting seperti viskositas, Ph, stabilitas warna, dan akurasi reproduksi warna (ΔE) belum dieksplorasi secara komprehensif dalam konteks bio-ink printing [8], [16].

Berdasarkan gap penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menjelaskan pengaruh variasi komposisi bio-ink yang terdiri dari ekstrak bunga telang dan gum arabic terhadap kualitas warna cyan yang dihasilkan dalam aplikasi inkjet printing. Penelitian ini akan mengevaluasi karakteristik fisiko-kimia bio-ink, termasuk pH dan viskositas, serta menganalisis kualitas warna menggunakan sistem L^*a^*b dan parameter ΔE sebagai indikator akurasi warna. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan bio-ink berkelanjutan untuk industri percetakan digital, sekaligus memanfaatkan potensi sumber daya alam lokal. Hipotesis penelitian ini adalah bahwa variasi komposisi ekstrak bunga telang dan gum arabic akan berpengaruh signifikan terhadap karakteristik fisiko-kimia dan kualitas warna cyan bio-ink, dengan terdapat komposisi optimal yang dapat menghasilkan akurasi warna terbaik untuk aplikasi inkjet printing.

METODE PENELITIAN

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah bubuk bunga telang (*Clitoria Ternatea*.) kering dan gum arabic. Bubuk bunga telang berfungsi sebagai sumber pewarna alami, sedangkan gum arabic digunakan sebagai bahan pengental. Konsentrasi bunga telang dan gum arabic berturut-turut yang digunakan adalah 1%, 3%, 5%, dan 7% dan 1%, 2%, 3%, dan 4%. Dengan melakukan pengujian untuk mengetahui bagaimana hasil pembuatan tinta organik dengan menggunakan bunga telang dan gum arabic. Ada beberapa tahapan proses yang akan dilakukan dalam penelitian.

Proses Ekstraksi Bunga Telang

- 1) Timbang bubuk bunga telang sebanyak 1%, 3%, 5%, dan 7% menggunakan timbangan digital.
- 2) Tuangkan masing-masing variasi bunga telang kedalam gelas kimia yang berisi larutan aquades dan etanol 70%.
- 3) Masing-masing variasi diaduk tanpa pemanasan selama 30 menit *hand mixer*.
- 4) Setelah itu, ekstrak bunga telang disaring menggunakan saringan 300 mesh.

Proses Pembuatan Bio-Ink

- 1) Siapkan alat dan bahan yang diperlukan antara lain gelas kimia, thermometer, *hand mixer*, ekstrak bubuk bunga telang, aquades, gum arabic, glyserin, dan natrium benzoat.
- 2) Timbang gum Arabic sebanyak 1%, 2%, 3%, dan 4% serta natrium benzoate menggunakan timbangan digital.
- 3) Kemudian, variasi sampel ekstrak bunga telang dipanaskan selama 15 menit dalam suhu 60 derajat celcius untuk pemekatan ekstrak.
- 4) Masing-masing ekstrak bunga telang dicampurkan dengan variasi gum arabic dan bahan tambahan lainnya menggunakan *hand mixer* hingga larutan terdispersi dengan baik.
- 5) Kemudian, bio-ink yang sudah terdispersi dengan baik dilakukan pengujian pH, viskositas, dan L^*a^*b .

HASIL DAN PEMBAHASAN

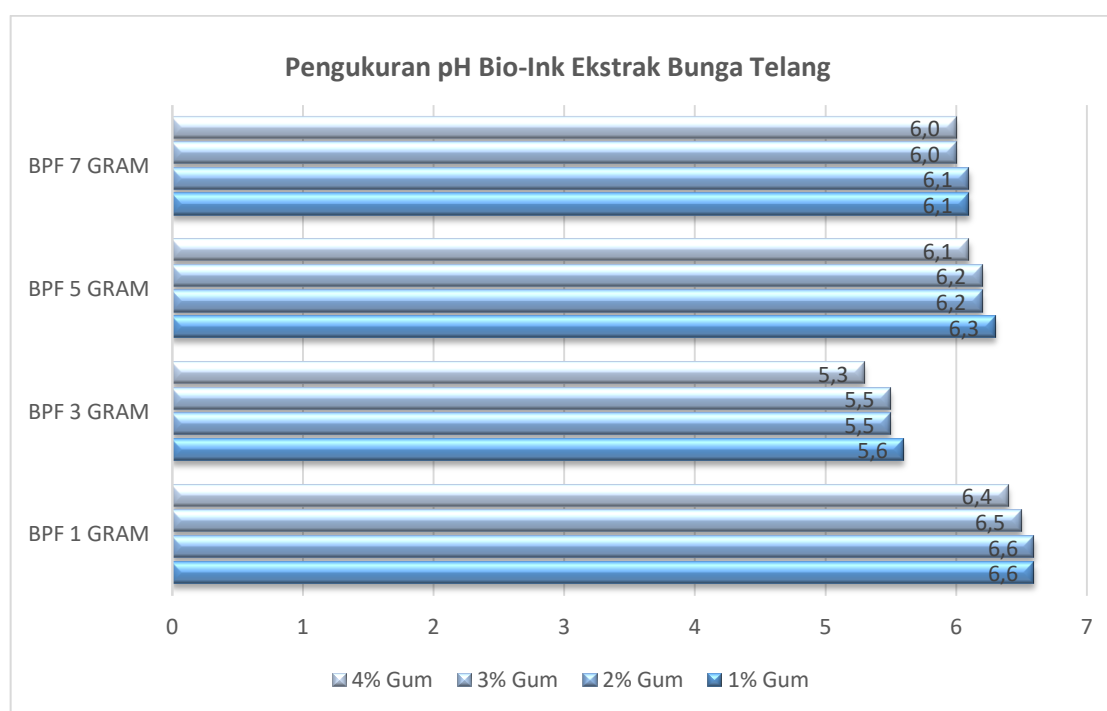
Nilai Ph

Nilai pH merupakan parameter penting dalam formulasi bio-ink yang dapat menunjukkan pengaruh kestabilan kimia tinta dan kompatibilitasnya dalam sistem inkjet printing. Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan sehingga diperoleh data sebagai berikut :

Tabel 1. Data Hasil Uji pH

Bunga Telang	Gum Arabic				Reference
	1 %	2 %	3%	4%	
1%	6,6	6,6	6,5	6,4	7-10 [17]
3%	5,6	5,5	5,5	5,3	
5%	6,3	6,2	6,2	6,1	
7%	6,1	6,1	6,0	6,0	

Hasil pengukuran pH menunjukkan rentang 5,3 – 6,6 yang ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai pH ini tergolong mendekati netral dan relative aman terhadap komponen printhead sehingga masih dapat diterima oleh aplikasi inkjet printing. Berdasarkan hasil uji analisis statistic anova, menunjukkan bahwa baik konsentrasi bunga telang maupun konsentrasi gum arabic memberikan pengaruh signifikan dengan nilai p-value berturut-turut sebesar 0.0001 dan 0.000 (P-value < 0.05). Hal ini diperkuat oleh nilai R-squared yang tinggi sebesar 99,28% menunjukkan bahwa variabel-variabel yang digunakan memiliki hubungan yang kuat. Visualisasi hubungan interaktif antara dua faktor dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik Pengujian Nilai Ph pada Bio-ink

Berdasarkan Gambar 1 menunjukkan adanya pola konsisten dimana peningkatan konsentrasi baik ekstrak bunga telang maupun gum Arabic yang cenderung menurunkan nilai ph formulasi. Pada konsentrasi bunga telang 1%, peningkatan gum Arabic dari 1% ke 4% menurunkan ph dari 6,6 menjadi 6,4. Terdapat pola yang serupa pada semua konsentrasi bunga telang, dengan penurunan ph yang paling signifikan terjadi pada konsentrasi bunga telang 3% dimana ph turun dari 6,3 (gum 1%) menjadi 5,3 (gum 4%). Hal ini menjelaskan bahwa gum arabic memberikan kontribusi keasaman yang lebih dominan dibandingkan ekstrak bunga telang.

Keadaan ini dapat terjadi akibat adanya sifat kimia yang dimiliki kedua komponen. Ekstrak bunga telang yang mengandung senyawa antosianin yang bersifat lemah asam, sementara gum Arabic adalah polisakarida yang dapat mengalami hidrolisis parsial sehingga menghasilkan gugus karbosit yang bersifat asam. Interaksi kedua komponen ini dapat menimbulkan adanya lingkungan yang semakin asam seiring peningkatan konsentrasi. Hal ini juga didukung berdasarkan hasil

Nilai Viskositas

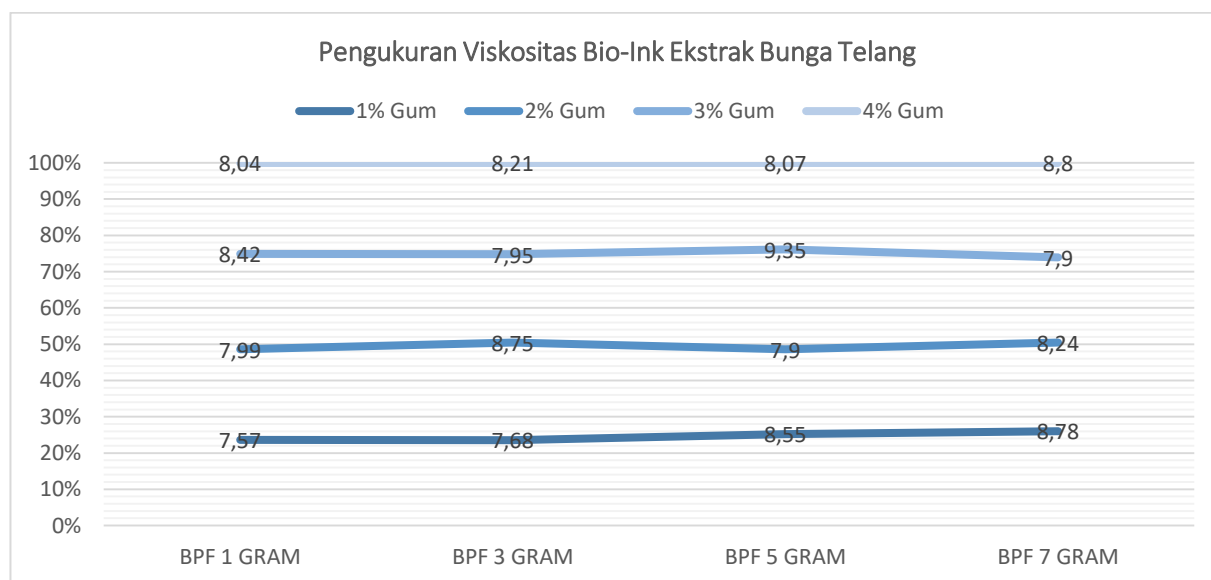
Viskositas digunakan untuk mengukur tingkat kekentalan suatu tinta, sehingga perlu dilakukan

sebagai parameter bio-ink khususnya pada aplikasi inkjet printing. Data hasil uji viskositas dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Hasil Uji Viskositas

Bunga Telang	Gum Arabic				Reference (mPa.s)
	1 %	2 %	3%	4%	
1%	7,57	7,99	8,42	8,04	2-10 mPa.s [17]
3%	7,68	8,75	7,95	8,21	
5%	8,55	7,9	9,35	8,07	
7%	8,78	8,24	7,9	8,80	

Berdasarkan Tabel 2 dapat dilihat terdapat variasi angka viskositas yang beragam dengan rentang 7,57 – 9,35 mPa.s. Analisis varians menunjukkan bahwa baik gum arabic maupun bunga telang tidak berpengaruh signifikan terhadap viskositas ($P\text{-value} > 0.05$). Nilai R-quares hanya sebesar 21,69% menunjukkan variabel-variabel yang digunakan memiliki Hubungan yang lemah dengan viskositas tinta. Namun, berdasarkan Gambar 2 dapat dilihat bahwa peningkatan konsentrasi bunga telang hingga titik tertentu menyebabkan viskositas meningkat, terutama pada konsentrasi gum arabic pada level menengah (2 dan 3%). Setelahnya, nilai viskositas cenderung kembali menurun.



Gambar 2. Grafik Pengujian Nilai Viskositas pada Bio-ink

Pada grafik garis yang ditunjukkan Gambar 2 memperlihatkan bahwa tidak semua konsentrasi menghasilkan peningkatan viskositas secara linear. Terdapat pola yang menunjukkan adanya titik optimal pada formulasi tertentu. Formulasi bunga telang 1 % menunjukkan peningkatan viskositas yang relative stabil dari 7,57 mPa.s (gum 1%) hingga 8,04 mPa.s (gum 4%). Namun, pada bunga telang 3%, terjadi peningkatan yang lebih signifikan mencapai puncak 8,75 mPa.s pada gum 2%. Sementara, formulasi bunga telang 5% dengan gum 3% menghasilkan viskositas tertinggi 9,35 mPa.s dan kembali menurun pada gum 4% menjadi 8,07 mPa.s. Hal ini dapat terjadi akibat peran gum arabic sebagai agen pengental yang membentuk jaringan intermolekul. Ekstrak bunga telang yang memiliki kandungan senyawa polifenol yang dapat berinteraksi dengan rantai polimer gum arabic, memperkuat struktur gel yang terbentuk. Namun, pada konsentrasi tinggi dapat terjadi *overthickening* sehingga struktur komponen tidak stabil dan viskositas menurun.

Nilai CIELAB & ΔE

Analisis warna menggunakan sistem CIE L^*a^*b pada Tabel 3 menunjukkan perbandingan karakteristik visual bio-ink dengan tinta komersial. Nilai L^* menunjukkan tingkat kecerahan dengan rentang 50,41 – 80,83, dimana nilai yang lebih tinggi mengindikasikan warna yang lebih cerah. Nilai a^* mayoritas bernilai negatif dengan rentang -12,84 hingga -3,55 menunjukkan warna hijau, sementara nilai b^* berkisar di angka -31,62 hingga -7,08 menggambarkan kecenderungan warna

biru.

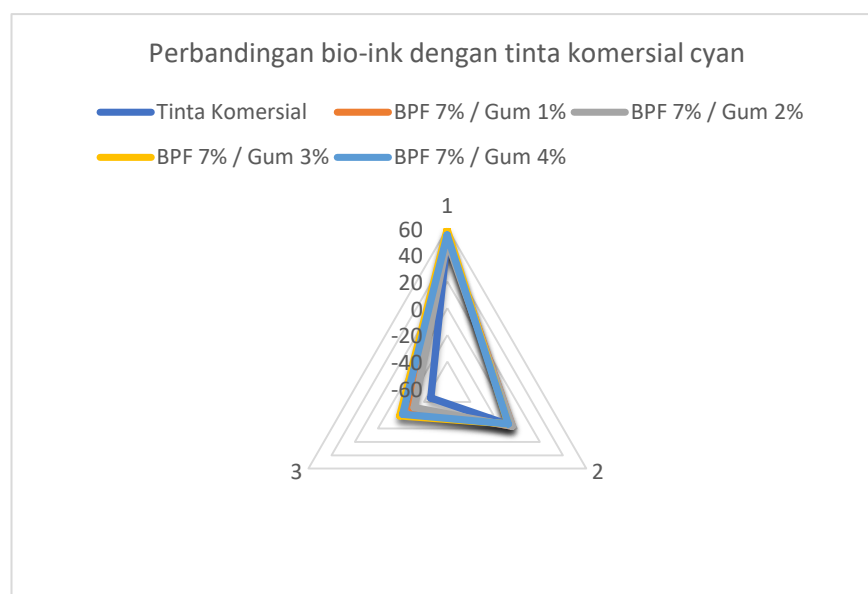
Tabel 3. Data Nilai CIELAB & ΔE

Bunga Telang	Nilai CIELAB & ΔE			
	L*	a*	b*	ΔE
BPF 1% / Gum 1%	79,46	-8,37	-9,15	45,47
BPF 1% / Gum 2%	78,68	-7,86	-7,08	46,69
BPF 1% / Gum 3%	78,82	-6,70	-11,47	43,13
BPF 1% / Gum 4%	80,83	-7,66	-9,23	46,17
BPF 3% / Gum 1%	60,99	-12,84	-14,94	33,00
BPF 3% / Gum 2%	71,28	-10,36	-14,76	36,58
BPF 3% / Gum 3%	61,33	-11,25	-17,96	29,89
BPF 3% / Gum 4%	58,84	-11,39	-20,08	27,30
BPF 5% / Gum 1%	65,62	-11,27	-17,09	32,15
BPF 5% / Gum 2%	57,60	-8,63	-21,41	25,23
BPF 5% / Gum 3%	62,03	-8,24	-18,99	28,62
BPF 5% / Gum 4%	61,28	-6,80	-22,43	25,00
BPF 7% / Gum 1%	53,03	-3,73	-29,94	15,99
BPF 7% / Gum 2%	50,41	-3,55	-31,62	14,55
BPF 7% / Gum 3%	55,71	-7,48	-19,86	26,33
BPF 7% / Gum 4%	54,84	-7,04	-21,66	24,42

Nilai ΔE yang mengevaluasi total perbedaan warna dengan standar tinta komersial menunjukkan rentang yang jauh 14,55 – 46,69. Semakin kecil nilai ΔE , semakin mirip warna bio-ink dengan tinta komersial cyan. Formula bunga telang 1% dengan gum 2% menghasilkan ΔE tertinggi, menunjukkan perbedaan nilai yang paling signifikan dari target nilai standar tinta komersial ($\Delta E > 20$). Sementara, formulasi bunga telang 7% dengan gum 2% menunjukkan ΔE terendah, menunjukkan kemiripan warna yang paling tinggi dengan nilai standar tinta komersial.

Pola kemiripan warna ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi ekstrak bunga telang cenderung menghasilkan warna yang lebih mendekati cyan komersial. Nilai ΔE tertinggi terjadi pada kombinasi konsentrasi gum arabic menengah dan bunga telang tertinggi. Hal ini didukung oleh hasil uji varians anova yang menunjukkan bahwa konsentrasi bunga telang memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai ΔE (P-value = 0.000), sedangkan gum arabic tidak berpengaruh signifikan (P-value = 0.957).

Berdasarkan pola kenaikan nilai ΔE dari seluruh sampel diperoleh variasi komposisi yang memberikan nilai paling seimbang dan kompetitif, dengan performa yang mendekati nilai tinta komersial ditunjukkan oleh nilai formulasi bunga telang 7%. Perbandingan nilai warna formulasi bunga telang 7% dengan nilai warna tinta komersial dapat dilihat pada gambar 3.




Pada Gambar 3 menunjukkan formulasi bunga telang 7% pendekatan warna yang cukup dekat mendekati tinta komersial, meskipun masih terdapat perbedaan dominan pada sumbu a*. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi bunga telang 7% adalah formulasi optimal yang mampu mencapai karakteristik warna tinta cyan komersial dengan akurasi yang cukup tinggi. Kedekatan akurasi nilai L*a*b ini menyebabkan nilai ΔE menjadi lebih rendah.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian optimalisasi komposisi bio-ink berbasis ekstrak bunga telang dan gum arabic untuk aplikasi tinta cyan pada inkjet printing, dapat disimpulkan beberapa hal penting. Variasi komposisi ekstrak bunga telang dan gum arabic memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik fisiko-kimia bio-ink yang dihasilkan. Semua formulasi menghasilkan nilai pH dalam rentang 5,3-6,6 yang sesuai dengan persyaratan teknis inkjet printing, dengan konsentrasi bunga telang memberikan pengaruh yang lebih dominan terhadap penurunan pH dibandingkan gum arabic. Nilai viskositas bio-ink berkisar antara 7,57-9,35 mPa.s, memenuhi standar teknis untuk aplikasi inkjet printing (2-10 mPa.s), meskipun tidak menunjukkan pola linear yang konsisten. Hal ini mengindikasikan adanya interaksi kompleks antara ekstrak bunga telang dan gum arabic dalam pembentukan struktur rheologi tinta. Evaluasi kualitas warna menggunakan sistem CIE Lab dan parameter Delta E menunjukkan bahwa formulasi dengan konsentrasi bunga telang 7% dan gum arabic 2% menghasilkan akurasi warna terbaik dengan nilai ΔE terendah sebesar 14,55. Konsentrasi ekstrak bunga telang terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap pencapaian warna cyan, sementara variasi gum arabic tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap akurasi warna.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. I. Nikmah, "Hubungan Antara Paparan Benzena Dengan Profil Darah Pada Pekerja Di Industri Percetakan X Kota Semarang," *J. Kesehat. Masy.*, vol. 4, 2016.
- [2] E. Yuniarti, E. Djonaedi, H. Rudi Kusumantoro, G. Zahira Adni Shaffa, and S. Salsabila, "Peningkatan Kualitas Bio-Ink dengan Penambahan Pigmen Kunyit Untuk Warna Yellow pada Printer Digital," *J. Teknol. Pangan Dan Ind. Perkeb. LIPIDA*, vol. 4, no. 2, pp. 51–59, Oct. 2024, doi: 10.58466/lipida.v4i2.1717.
- [3] A. M. Thakker and D. Sun, "Plant-based ink properties and storage stability for inkjet printing," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, no. 5, pp. 8099–8117, Jan. 2024, doi: 10.1007/s11356-023-31714-y.
- [4] A. E. Kirkland, M. T. Langan, and K. F. Holton, "Artificial food coloring affects EEG power and ADHD symptoms in college students with ADHD: a pilot study," *Nutr. Neurosci.*, vol. 25, no. 1, pp. 159–168, Jan. 2022, doi: 10.1080/1028415X.2020.1730614.
- [5] A. M. - and P. B. -, "The Natural Way of Food Colouring," *Int. J. Multidiscip. Res.*, vol. 6, no. 2, p. 16073, Apr. 2024, doi: 10.36948/ijfmr.2024.v06i02.16073.
- [6] N. Binti Uma, "Production of Tri-Color Printer Ink by Natural Pigment Extraction," *J. Mod. Educ. Rev.*, vol. 6, no. 9, pp. 655–659, Sep. 2016, doi: 10.15341/jmer(2155-7993)/09.06.2016/010.
- [7] D. R. Ramadhani and M. Husnah, "Karakteristik Arang Kulit Durian Dan Daun Jenggelan Untuk Pembuatan Tinta Organik," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 7, pp. 199 - 206, Jul. 2024, doi:10.30596/rmme.v7i2.18962
- [8] L. Anggraini, "Potensi Ekstrak Bunga Telang (*Clitoria Ternatea*) Sebagai Pewarna Alami Lokal Pada Berbagai Industri Pangan," *CANREA JOURNAL*, vol. 2, no. 2, pp. 32-37, Apr. 2019, doi :10.20956/canrea.v2i1.120
- [9] A. Ozcan, S. Coskun, and E. Arman Kandirmaz, "Environmentally Friendly Water-Based Inkjet Ink Production And Determining Printability," in *Proceedings - The Twelfth International Symposium GRID 2024*, University Of Novi Sad Faculty Of Technical Sciences Department Of Graphic Engineering And Design 21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, Nov. 2024. doi: 10.24867/GRID-2024-p12.

- ◆ 
- [10] K. Nisa and Mahagiyani, “Analisis Kelayakan Ekonomi Penjualan Tinta Printer Berbahan Baku Pelepah Kelapa Sawit Skala Industri Rumahan,” in *proceedings Seminar Nasional Diseminasi Hasil Penelitian 2021*, Universitas Janabadra Yogyakarta, 2021.
- [11] N. R. Amadea, “Pengaruh Komposisi Bahan Tinta Dari Pigmen Organik Ampas Kopi Terhadap Pencapaian Warna Hitam Pada Screen Printing” Repository Politeknik Negri Jakarta, 2021. repository.pnj.ac.id/id/eprint/3402
- [12] M. Wang *et al.*, “Green fabrication of inkjet printed antibacterial wool fabric with natural gardenia yellow dye,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 206, p. 117700, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.indcrop.2023.117700.
- [13] F. Aprilliani, L. Putri Ayuningtyas, and H. Adila Lestari, “Bunga Telang (*Clitoria ternatea* L.) Sebagai Indikator pH dalam Sistem Kemasan Pintar,” *Agroteknika*, vol. 5, no. 2, pp. 87–97, Jul. 2022, doi: 10.55043/agroteknika.v5i2.133.
- [14] A. Rahmi, H. Sanjaya, F. Amelia, and A. Putra, “Kelarutan Zat Warna Kunyit (*Curcuma longa* linn) dan Bunga Telang (*Clitoria ternatea*) dalam Gelasi Mikroemulsi Water In Oil Sistem Air, Surfaktan Nonionik Tween 60 dan Sikloheksana,” vol. 11, no. 2, 2022.
- [15] T. O. Hay, J. R. Nastasi, S. Prakash, and M. A. Fitzgerald, “Comparison of Gidyea gum, gum Arabic, and maltodextrin in the microencapsulation and colour stabilisation of anthocyanin-rich powders using freeze-drying and spray-drying techniques,” *Food Hydrocoll.*, vol. 163, p. 111023, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.111023.
- [16] R. W. Larasati, “NATINK (Natural Ink) untuk Printer Inkjet Berbasis Tanaman Lokal” Repository Universitas Sebelas Maret, 2019. [Online]. digilib.uns.ac.id/dokumen/detail/74615
- [17] C. Gao *et al.*, “Study on the quality and inkjet printing effect of the prepared washing-free disperse dye ink,” *RSC Adv.*, vol. 13, no. 18, pp. 12141–12152, 2023, doi: 10.1039/D3RA01597A.