

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Implementasi sistem manufaktur cerdas dalam kerangka Industri 4.0 menuntut proses produksi yang adaptif, terukur, presisi, serta terintegrasi secara *real-time* dengan sistem komputasi. Dalam skala global, industri berbasis warna seperti cat, *coating*, tinta, dan material polimer menghadapi tantangan utama berupa konsistensi kualitas warna antar *batch* produksi. Variabilitas komposisi pigmen, dinamika pencampuran di dalam tangki, serta fluktuasi pencahayaan lingkungan produksi dapat menyebabkan deviasi warna yang signifikan terhadap standar konsumen. Ketidaksesuaian warna ini tidak hanya berdampak pada penurunan kualitas produk, tetapi juga memicu akumulasi limbah kimia akibat kegagalan produksi serta meningkatkan biaya operasional melalui proses *rework* manual yang tidak efisien. Oleh karena itu, sistem pengendalian warna yang presisi dan berbasis umpan balik *real-time* menjadi kebutuhan mendasar dalam arsitektur *Cyber-Physical Production System* (CPPS) modern [1].

Pada sistem pencampuran warna otomatis, akurasi hasil ditentukan oleh kemampuan sistem dalam mengevaluasi karakteristik warna secara objektif. Sistem *vision* berbasis kamera umumnya merepresentasikan warna dalam ruang warna RGB (*Red, Green, Blue*). Namun, dalam konteks otomasi industri, RGB memiliki kelemahan teknis yang kritis karena kanal warna (kromatik) dan tingkat kecerahan (luminansi) tercampur dalam satu paket data. Secara matematis, perubahan intensitas cahaya lampu atau munculnya bayangan di lingkungan pabrik akan menggeser nilai ketiga kanal RGB secara simultan, meskipun komposisi pigmen cat tidak berubah. Hal ini menyebabkan sistem kendali sulit membedakan antara perubahan warna asli dan gangguan cahaya, yang berpotensi menghasilkan galat (*error*) koreksi yang tidak proporsional dan menurunkan akurasi proses pencampuran secara keseluruhan [2].

Sebagai alternatif, ruang warna HSV (*Hue, Saturation, Value*) menawarkan representasi yang lebih stabil karena memisahkan komponen warna (*Hue*) dari intensitas pencahayaan (*Value*). Penelitian terdahulu, seperti yang dilakukan oleh Cai

et.al pada tahun 2023, menunjukkan stabilitas HSV pada kondisi pencahayaan bervariasi. Namun, terdapat sebuah *research gap* yang signifikan: penelitian tersebut masih terbatas pada tahap identifikasi statis dan belum mencakup spektrum warna yang luas untuk kebutuhan industri. Sebagian besar sistem hanya mampu mengenali spektrum warna terbatas, sehingga kurang adaptif terhadap variasi produk. Selain itu, sistem tersebut belum mampu melakukan "perbaikan" komposisi material secara otomatis dalam sebuah siklus aktuasi fisik yang utuh [3].

Perancangan purwarupa otomasi pencampuran cat ini merupakan sebuah sistem terintegrasi yang pengembangannya direalisasikan melalui kolaborasi dua domain penelitian paralel. Domain pertama dikembangkan oleh Daffa Raihan dalam penelitiannya yang berjudul "Rancang Bangun Sistem Pencampuran Cat Otomatis Menggunakan Pompa Peristaltik dengan Metode Sequential Control, PWM Control, dan Gravimetric Dosing". Penelitian tersebut berfokus pada pengendalian aktuasi mekanis dan dinamika aliran fluida, yang mencakup penerapan *Sequential Control*, pengaturan debit pompa berbasis *Pulse Width Modulation (PWM)*, serta penakaran bahan lelaui metode *Gravimetric Dosing*. Pengendalian tersebut bertugas memantau jumlah bahan cat yang masuk melalui sensor *load cell* secara *real-time*, sehingga akurasi penuangan fisik cat data terjamin dengan ralat minimal [4].

Sebagai pelengkap sekaligus pusat pengambilan keputusan dari arsitektur tersebut, penelitian ini hadir secara spesifik untuk memegang kendali pada domain evaluasi optis dan algoritma koreksi. Fokus penelitian ini adalah mengembangkan sistem yang mampu menangani spektrum luas hingga 15 warna dasar, dengan optimasi pada 5 warna utama industri yaitu merah, kuning, biru, hitam, dan putih. Pendekatan ini menuntut metode koreksi yang presisi melalui perhitungan *Euclidean Distance* untuk mengukur deviasi warna dan algoritma *Proportional* untuk penyesuaian dosis pigmen. Keandalan sistem ini juga didukung oleh integrasi perangkat keras yang efisien, di mana Raspberry Pi 4 sebagai unit pemrosesan citra berkomunikasi dengan Arduino Mega melalui protokol UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*). Komunikasi serial UART dipilih untuk memastikan transmisi data instruksi gramasi dan umpan balik status aktuator berjalan secara *real-time* dengan latensi rendah [5].

Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada penggabungan umpan balik visual (kamera) untuk deteksi warna dan umpan balik massa (*Load Cell*) untuk presisi penakaran pigmen melalui pompa peristaltik dalam mekanisme *Dual-Feedback Loop*. Dengan integrasi ini, diharapkan tercipta mekanisme *self-correction* yang mandiri dan adaptif, yang mampu mengoreksi deviasi pada spektrum warna yang kompleks secara otomatis hingga mencapai kondisi *steady-state*, sehingga mampu menjawab tantangan efisiensi pada lini produksi manufaktur cat modern [6].

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan dalam tugas akhir ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana perbandingan stabilitas pembacaan warna antara ruang warna RGB dan HSV saat diuji di bawah kondisi intensitas cahaya yang divariasikan?
2. Bagaimana merancang arsitektur sistem kendali tertutup yang mengintegrasikan umpan balik visual (kamera) dan umpan balik massa (*load cell*) untuk koreksi warna secara *real time*?
3. Bagaimana mengimplementasikan metode *Euclidean Distance* pada ruang warna HSV sebagai parameter kuantitatif untuk menentukan deviasi warna hasil pencampuran?
4. Bagaimana merancang algoritma *Iterative Proportional* yang mampu menentukan dosis penambahan pigmen secara presisi sehingga mencapai target warna dalam batas toleransi ΔE tertentu?
5. Bagaimana pengaruh penggunaan ruang warna HSV dalam menjaga stabilitas parameter evaluasi pada sistem kendali tertutup dibandingkan dengan ruang warna RGB terhadap fluktuasi intensitas cahaya?

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Tugas akhir yang penulis laksanakan memiliki tujuan antara lain:

1. Menganalisis perbandingan stabilitas pembacaan warna ruang warna RGB dan HSV saat diuji di bawah variasi intensitas pencahayaan lingkungan.
2. Merancang arsitektur sistem kendali tertutup (*closed – loop*) yang

mengintegrasikan kamera dan sensor *load cell* untuk mengeksekusi koreksi warna secara *real-time*.

3. Mengimplementasikan metode *Euclidean Distance* pada ruang warna HSV untuk mengkuantifikasi nilai deviasi warna (ΔE) sebagai parameter galat sistem.
4. Mengembangkan algoritma kendali *Proportional* untuk menentukan dosis aktuasi pigmen secara presisi guna mencapai titik konvergensi target warna di bawah ambang batas toleransi ΔE .

1.4 Manfaat Tugas Akhir

1. Memberikan kontribusi teknis dalam pengembangan sisistem pencampuran warna berbasis *vision* dengan pendekatan evaluasi warna menggunakan ruang warna HSV
2. Implementasi konversi RGB ke HSV memungkinkan pemisahan parameter kormatik dan luminasi sehingga meningkatkan stabilitas pembacaan warna terhadap variasi pencahayaan
3. Deviasi warna yang dihitung berdasarkan komponen *hue*, *saturation*, dan *value* dapat digunakan sebagai variabel *error* dalam sistem kendali tertutup untuk menentukan koreksi konsetrasi warna secara iteratif

1.5 Batasan Masalah

Supaya penyusunan tugas akhir dapat lebih terarah, maka terdapat Batasan masalah pada alat, antara lain:

1. Sistem menggunakan kamera digital sebagai sensor warna dengan kondisi pencahayaan yang dikendalikan dan tidak membahas pengaruh perubahan spektrum cahaya ekstrem.
2. Ruang warna yang digunakan terbatas pada konversi RGB ke HSV dan tidak dilakukan perbandingan dengan ruang warna lain seperti CIELAB atau YCbCr.
3. Warna dasar yang digunakan dalam proses pencampuran dibatasi pada 5 pigmen utama sebagai komponen pembentuk warna (merah, biru, kuning, putih, hitam)
4. Pengujian dan analisis tingkat akurasi pencampuran warna dibatasi hanya pada 5 target warna utama, yaitu *Orange*, *Sky Blue*, Hijau, Violet, dan Hijau Zaitun.

5. Evaluasi deviasi warna dilakukan berdasarkan parameter hue, saturation, dan value tanpa menggunakan instrumen kalibrasi industri seperti spektrofotometer atau colorimeter profesional.
6. Pengujian sistem difokuskan pada akurasi warna, stabilitas pembacaan, dan waktu konvergensi terhadap warna target, tanpa melakukan analisis umur pakai pigmen atau degradasi material.
7. Sistem pengendalian dan penakaran pigmen cat dilakukan secara *gravimetric* berbasis parameter massa(gram) menggunakan sensor *load cell*, sehingga tidak melakukan pengukuran langsung terhadap volume (ml) maupun fluktuasi densitas cairan secara *real-time*

1.6 Sistematika Tugas Akhir

Proposal Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab yang berhubungan satu sama lain. Sistematika penulisan dan pembahasan dalam penulisan ini yaitu:

BAB 1 PENDAHULUAN

Pada BAB ini akan membahas hal yang melatarbelakangi pembuatan suatu alat atau sistem pada Tugas Akhir, rumusan masalah alat atau sistem, tujuan alat atau sistem, manfaat alat atau sistem, batasan masalah alat atau sistem, serta sistematika penulisan.

BAB 2 DASAR TEORI

Pada BAB ini akan dibahas tinjauan pustaka yang berisikan informasi penelitian terdahulu yang memiliki relevansi serta teori mengenai komponen maupun alat yang digunakan dalam pembuatan Tugas Akhir.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Pada BAB ini akan dibahas mengenai terkait komponen yang dibutuhkan dalam pembuatan alat, juga membahas terkait bagaimana sistem berjalan, spesifikasi sistem serta teknik fabrikasi.

BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISA

Pada BAB ini membahas terkait pengujian alat dan sistem serta analisis alat yang sudah dirancang sebelumnya.

BAB 5 PENUTUP

Pada BAB ini membahas terkait kesimpulan yang didapatkan dari hasil yang sudah diuji serta dianalisa sehingga mendapatkan saran untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Pada bagian ini memuat referensi penulisan serta sumber yang dikutip oleh penulis.

LAMPIRAN

Pada bagian ini berisi hal yang termasuk sisipan dan keterangan oleh penulis yang berisikan tentang topik yang penulis tulis