

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Setelah melakukan studi literatur terkait topik yang dibahas baik dari jurnal dan paper nasional maupun internasional, didapati beberapa penelitian yang menjadi inspirasi penulis. Berikut beberapa penelitian tersebut.

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka

No	Peneliti & Judul	Keterangan	Keterbatasan dan Keselarasan
1	Kang Ho Park et al. (2021) “ <i>HSV Color – Space – Based Automated Object Localization for Robot Grasping without Prior Knowledge</i> ”	Penelitian ini mengembangkan sistem lokalisasi objek berbasis warna untuk mendukung proses <i>Robot Grasping</i> . Kamera digunakan untuk menangkap citra objek pada area kerja robot. Citra yang diperoleh lalu dikonversi dari ruang warna RGB ke ruang warna HSV untuk memisahkan komponen warna dari intensitas cahaya. Selanjutnya dilakukan proses thresholding dan segmentasi warna untuk mengidentifikasi area objek berdasarkan nilai Hue dan Saturation tertentu. Setelah objek	Penelitian ini hanya berfokus pada deteksi dan lokalisasi objek berbasis warna, tanpa melakukan analisis kesalahan warna terhadap standar tertentu. Sistem juga tidak dirancang untuk melakukan koreksi warna atau pengendalian komposisi material dalam proses produksi. Dengan demikian, metode ini masih terbatas pada tahap identifikasi visual.

		terdeteksi, sistem menghitung posisi objek dalam koordinat ruang kerja robot dan mengirimkan informasi tersebut ke pengendali robot sehingga robot dapat melakukan proses pengambilan objek secara otomatis [7].	
2	Mustafa Akis dan Murat Dislitas (2024) “ <i>Intelligent Lighting System Using Color – Based Image Processing for Robotic Handling Applications</i> ”	Penelitian ini mengembangkan sistem pengolahan citra berbasis warna yang dipadukan dengan kontrol pencahayaan adaptif. Kamera menangkap citra objek pada area kerja robot, kemudian citra diproses menggunakan algoritma pengolahan citra untuk mengekstraksi fitur warna. Sistem pencahayaan dikontrol secara otomatis untuk menjaga konsistensi intensitas cahaya sehingga deteksi warna tetap stabil. Informasi warna yang diperoleh kemudian digunakan untuk membantu robot dalam	Sistem hanya digunakan dalam mengidentifikasi objek dalam proses robotic handling, serta penelitian ini tidak membahas pengukuran deviasi warna terhadap standar warna tertentu maupun mekanisme koreksi komposisi warna secara otomatis

		melakukan proses penanganan objek pada jalur produksi [8].	
3	Ambrus et al. (2024) <i>“The Effect of Illumination on HSV Colour Segmentation for Ripe Tomatoes based on Machine Vision”</i>	Penelitian ini mengembangkan metode segmentasi objek berbasis ruang warna HSV untuk mendeteksi tingkat kematangan buah tomat menggunakan sistem machine vision. Kamera menangkap citra objek yang kemudian dikonversi dari ruang warna RGB ke ruang warna HSV. Setelah konversi dilakukan, sistem melakukan proses segmentasi warna berdasarkan nilai Hue dan Saturation untuk memisahkan objek tomat dari latar belakang. Eksperimen dilakukan dengan berbagai tingkat pencahayaan buatan untuk mengevaluasi pengaruh iluminasi terhadap hasil segmentasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat pencahayaan sangat mempengaruhi akurasi	Penelitian ini hanya menganalisis pengaruh pencahayaan terhadap akurasi segmentasi HSV dan belum mengembangkan sistem yang mampu melakukan penyesuaian warna secara otomatis terhadap target tertentu. Selain itu, penelitian ini tidak mengintegrasikan mekanisme kendali fisik yang dapat mengoreksi komposisi warna dalam suatu proses produksi.

		segmentasi, di mana nilai iluminasi di atas 3000 lux memberikan hasil segmentasi yang lebih stabil [9].	
4	Puchuan Song (2025) “ <i>Object Detection Based on HSV in Open CV</i> ”	Penelitian yang dilakukan oleh Puchuan Song mengembangkan sistem deteksi objek berbasis warna secara real-time menggunakan ruang warna HSV dengan memanfaatkan library OpenCV. Sistem ini menggunakan kamera yang terhubung dengan perangkat komputasi untuk menangkap citra objek secara kontinu. Citra yang diperoleh kemudian dikonversi dari ruang warna RGB ke ruang warna HSV untuk memisahkan komponen warna dengan intensitas pencahayaan. Setelah proses konversi dilakukan, sistem menerapkan metode segmentasi warna dengan menentukan rentang nilai Hue,	Penelitian yang telah dilakukan oleh Puchuan memberi hasil terkait dengan deteksi objek warna secara real time, namun penelitian tersebut masih memiliki beberapa keterbatasan. Sistem yang diusulkan hanya berfokus pada proses identifikasi objek berdasarkan warna tanpa melakukan analisis deviasi warna terhadap referensi standar tertentu. Selain itu, sistem tidak dirancang untuk melakukan proses koreksi warna atau penyesuaian komposisi warna secara otomatis dalam suatu proses produksi. Dengan demikian, pendekatan

		Saturation, dan Value tertentu untuk mengekstraksi objek dengan warna target. Hasil segmentasi kemudian diproses lebih lanjut menggunakan teknik contour detection untuk menentukan lokasi serta bentuk objek yang terdeteksi. Dengan pendekatan ini, sistem mampu melakukan identifikasi objek berdasarkan warna secara real-time pada aliran video yang diperoleh dari kamera [10].	yang digunakan masih terbatas pada tahap deteksi warna dalam sistem computer vision dan belum terintegrasi dengan mekanisme kendali tertutup yang dapat mengatur proses fisik secara langsung.
5	Rocco Furferi & Michaela Servi (2023) <i>“A Machine Vision-Based Algorithm for Color Classification of Recycled Wool Fabrics”</i>	Penelitian yang dilakukan oleh Rocco Furferi dan Michaela Servi mengembangkan sistem klasifikasi warna kain wol daur ulang menggunakan pendekatan machine vision yang dikombinasikan dengan probabilistic neural network (PNN). Sistem ini diawali dengan proses akuisisi citra menggunakan kamera	Sistem yang dikembangkan hanya focus pada proses klasifikasi material tekstil dan tidak dirancang untuk melakukan analisis deviasi warna terhadap target warna tersebut. Metode yang digunakan juga bergantung pada proses pelatihan jaringan saraf dengan dataset kain

		resolusi tinggi yang ditempatkan pada ruang pencahayaan terkontrol untuk memperoleh citra kain secara konsisten. Setelah citra diperoleh, dilakukan proses pengolahan citra untuk mengekstraksi informasi warna dari setiap piksel pada gambar. Nilai warna RGB kemudian dipetakan ke dalam sistem warna standar RAL color chart menggunakan perhitungan jarak warna sehingga setiap piksel dapat direpresentasikan oleh warna referensi terdekat. Selanjutnya jumlah piksel pada beberapa kelas warna dominan dihitung dan digunakan sebagai parameter fitur warna dari kain tersebut. Parameter warna ini kemudian digunakan sebagai input untuk melatih model probabilistic neural network, yang bertugas mengklasifikasikan sampel kain ke dalam	yang telah diklasifikasikan oleh kualitas dataset pelatihan. Sistem ini juga tidak mengintegrasikan mekanisme pengendalian proses fisik atau koreksi warna secara otomatis, melainkan hanya digunakan sebagai alat bantu untuk proses pemilahan material tekstil berdasarkan warna.
--	--	---	--

		sejumlah kelas warna yang telah ditentukan sebelumnya. Sistem yang dihasilkan mampu mengklasifikasikan kain wol daur ulang secara otomatis dengan tingkat reliabilitas sepenulis 83% berdasarkan pengujian pada dataset kain yang telah dikategorikan oleh operator manusia [11].	
--	--	--	--

2.2 Konsep Dasar Citra Digital dan Elemen Citra

Citra digital adalah representasi visual suatu objek atau pemandangan yang disampaikan dalam bentuk data diskrit yang dapat diproses oleh komputer. Berbeda dengan teknologi analog, pemrosesan citra digital merekam dan menyimpan informasi gambar dalam format biner (1 atau 0) selama informasi aslinya akurat, proses penyalinan tidak akan memengaruhi gambar asli sehingga informasi nyata tetap terjaga. Sifat tersebut menjadikan citra digital unggul dalam hal reproduktibilitas dan presisi dibandingkan representasi analog.

Unit terkecil pembentukan citra adalah *pixel* (*Picture Element*). Setiap piksel merupakan titik diskrit pada grid dua dimensi yang memiliki koordinat spasial (x,y) dan membawa nilai intensitas warna. Setiap piksel dapat diasosiasikan dengan nilai warna tertentu; pada ruang warna RGB, setiap elemen vektor warna memiliki rentang dinamis 8-bit, yang berarti terdapat $2^8 = 256$ nilai berbeda per saluran, menghasilkan total $256 \times 256 \times 256 = 16.777.216$ kemungkinan warna.

Elemen-elemen utama citra digital meliputi:

1. Resolusi spasial: jumlah piksel per satuan luas yang menentukan tingkat detail citra.
2. Kedalaman bit (*bit depth*): jumlah bit yang digunakan untuk merepresentasikan nilai intensitas setiap piksel.

3. Saluran warna (*color channel*): komponen warna yang membentuk model warna tertentu (misalnya R, G, B).

Resolusi pemrosesan yang tinggi merupakan keunggulan teknologi citra digital dibanding teknologi analog, karena informasi direkam dalam bentuk kisi-kisi piksel (*pixel lattice*) yang terstruktur. Struktur piksel yang terorganisasi ini memungkinkan algoritma pemrosesan citra, termasuk sistem koreksi warna otomatis, bekerja secara efisien pada setiap elemen gambar secara individual maupun kolektif [12].

2.3 Proses Pengolahan Spektrum Cahaya Menjadi Citra 8-Bit

Proses terbentuknya citra digital dimulai dari penangkapan spektrum cahaya oleh sensor kamera. Sensor yang paling umum digunakan adalah sensor Bayer RGB. Sensor Bayer RGB menggunakan pola masker warna dengan susunan berulang merah (R), hijau (G), dan biru (B); unit terkecil sensor ini merupakan pola 2×2 piksel yang berulang secara periodik pada seluruh area sensor. Sensor hijau mendominasi pola ini karena mata manusia paling sensitif terhadap cahaya hijau [13].

Setelah cahaya ditangkap, sensor menghasilkan sinyal analog yang kemudian dikonversi menjadi nilai digital melalui proses *Analog-to-Digital Conversion* (ADC). Sensor kamera modern dapat menangkap rentang dinamis yang lebih luas daripada yang dapat ditampilkan oleh layar modern; sementara layar modern hanya memerlukan 8 atau 10 bit per saluran warna, sensor kamera merekam 12 hingga 16 bit informasi per titik foto (*photo site*) [14].

Proses pengolahan selanjutnya melibatkan tahap demosaicing, yaitu rekonstruksi nilai warna penuh dari data piksel Bayer yang hanya memuat satu saluran warna per piksel. Penggabungan nilai RGB secara naif dapat menghasilkan artefak visual seperti "warna palsu" (*false color*) atau efek zippering; setelah *demosaicing*, langkah-langkah tambahan harus dilakukan untuk membersihkan gambar RAW [15].

Pada langkah akhir, data dikonversi menjadi format 8-bit per saluran, menghasilkan citra dengan kedalaman warna 24-bit ($3 \text{ saluran} \times 8\text{-bit}$). Format layar warna sejati (*true color*) dengan presisi 8-bit pada setiap saluran mampu menampilkan sepenulis 16,7 juta warna. Pemilihan representasi 8-bit merupakan

kompromi optimal antara kapasitas penyimpanan, kecepatan komputasi, dan kualitas visual yang dapat dipersepsi oleh mata manusia [16].

2.4 Struktur Ruang Wara RGB dan Keterbatasan Komputasi

Ruang warna RGB (*Red, Green, Blue*) adalah model warna aditif yang paling umum digunakan dalam sistem komputer dan perangkat tampilan digital. Model RGB adalah sistem warna aditif di mana dua warna dapat dijumlahkan untuk menghasilkan warna ketiga; model ini sangat intuitif dan berorientasi pada cara penglihatan manusia dalam mempersepsi warna. Setiap piksel direpresentasikan sebagai triplet nilai (R, G, B) dengan masing-masing komponen berada pada rentang $[0, 255]$ untuk format 8-bit [17].

Ruang warna RGB memiliki keterbatasan signifikan dalam konteks pemrosesan dan analisis warna komputasional:

1. Ketidakteragamannya Perseptual: Ketidakteragaman ruang RGB dalam persepsi manusia menyebabkan di beberapa wilayah ruang warna RGB, warna-warna yang berbeda dipersepsi sama, sementara di wilayah lain warna dapat melompat lebih dari satu JND (*Just Noticeable Difference*). Akibatnya, jarak *Euclidean* antar titik warna dalam ruang RGB tidak mencerminkan perbedaan warna yang sesungguhnya dirasakan manusia.
2. Korelasi Antar Saluran: Dalam ruang warna RGB, ketiga saluran warna saling berkorelasi dengan jumlah cahaya yang mengenai permukaan objek; dengan kata lain, warna dan properti kecerahan tidak terpisah satu sama lain, sehingga warna juga mempengaruhi kecerahan dan kecerahan mempengaruhi warna. Hal ini menjadi masalah besar dalam tugas deteksi warna karena perubahan kondisi pencahayaan akan mengubah ketiga komponen RGB sekaligus.
3. Kesulitan Segmentasi Warna: Karena informasi warna dan kecerahan tercampur dalam satu ruang, segmentasi objek berdasarkan warna tertentu dalam kondisi pencahayaan yang bervariasi menjadi sangat tidak konsisten menggunakan RGB murni.
4. Keterbatasan Representasi Jarak Warna: Pendekatan pengukuran jarak *Euclidean* dalam ruang RGB memperlakukan nilai R, G, dan B setara dengan koordinat Kartesius X, Y, dan Z; namun hal ini tidak memperhitungkan ketidakteragaman perseptual ruang warna tersebut

Keterbatasan tersebut yang menjadi acuan penggunaan ruang warna alternatif seperti HSV dalam sistem pemrosesan citra untuk keperluan analisis dan koreksi warna.

2.5 Transformasi Ruang Warna HSV Pada Pemrosesan Citra Komputasional

Ruang warna HSV (*Hue, Saturation, Value*) merupakan transformasi dari ruang warna RGB yang dirancang untuk merepresentasikan warna dengan cara lebih sesuai persepsi manusia. Model warna HSV berakar dari sistem visual manusia dan menawarkan representasi yang lebih intuitif; model ini menggunakan koordinat silindris untuk mengekspresikan titik-titik RGB, di mana H (*Hue*) merepresentasikan warna sebagai nilai sudut, S (*Saturation*) menunjukkan saturasi, dan V (*Value*) merepresentasikan kecerahan [18].

Dalam model HSV, nilai *hue* melintasi spektrum warna dimulai dari merah pada 0° , beralih ke hijau pada 120° , biru pada 240° , dan kembali secara siklik ke merah pada 360° . Representasi unik ini selaras dengan persepsi manusia dan memudahkan analisis informasi warna dalam citra.

Secara matematis, konversi dari RGB ke HSV dengan asumsi $H \in [0^\circ, 360^\circ]$, $S, V, R, G, B \in [0,1]$, $\text{Max} = \max\{R, G, B\}$, dan $\text{Min} = \min\{R, G, B\}$ menggunakan rumus 2.0 dibawah ini:

$$\begin{aligned}
 V &= \text{Max} \\
 S &= \begin{cases} \frac{\text{Max} - \text{Min}}{\text{Max}} & \text{jika Max} \neq 0 \\ 0 & \text{jika Max} = 0 \end{cases} \\
 H &= \begin{cases} 60^\circ \times \frac{G - B}{\text{Max} - \text{Min}} & \text{jika Max} = R \\ 60^\circ \times \left(2 + \frac{B - R}{\text{Max} - \text{Min}}\right) & \text{jika Max} = G \\ 60^\circ \times \left(4 + \frac{R - G}{\text{Max} - \text{Min}}\right) & \text{jika Max} = B \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Dalam ruang warna HSV, hanya ada satu saluran – saluran H – yang mendeskripsikan warna itu sendiri, sementara saluran S merepresentasikan saturasi dan saluran V merepresentasikan intensitas; inilah alasan mengapa HSV sangat berguna untuk tugas-tugas penyingkapan warna tertentu.

Masing-masing ruang warna memiliki keunggulan unik yang sesuai untuk aplikasi tertentu; sebagai contoh, RGB umum digunakan pada perangkat tampilan, sementara HSV lebih berfokus pada deteksi objek berbasis warna.

Salah satu aplikasi kunci HSV dalam sistem koreksi warna adalah penggunaan jarak *Euclidean* untuk mengukur kemiripan warna antar piksel. Jarak *Euclidean* dalam ruang HSV dapat dihitung menggunakan komponen H, S, dan/atau V; jika menggunakan ketiga komponen, ukuran N ditentukan sebagai $N = N_H \cdot N_S \cdot N_V$ di mana N_H , N_S , N_V adalah bin kuantisasi dari masing-masing komponen, Saturation, dan Value [19].

Penelitian menunjukkan potensi lebih tinggi dari agregasi menggunakan saluran HSV dibandingkan saluran RGB; bergantung pada jenis citra yang digunakan, beberapa metode lebih sesuai diterapkan pada ruang HSV dibanding RGB.

Penggunaan jarak *Euclidean* HSV dalam sistem koreksi warna cat otomatis memungkinkan sistem untuk mengidentifikasi deviasi warna secara lebih andal dibandingkan menggunakan RGB, karena pemisahan komponen warna (H), saturasi (S), dan kecerahan (V) meminimalkan pengaruh variasi pencahayaan lingkungan terhadap hasil pencocokan warna

2.6 Sistem *Computer Vision* Dalam Otomasi Industri

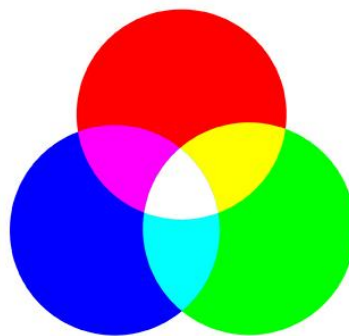
Computer Vision merupakan bagian dari teknologi penginderaan visual yang digunakan untuk mengekstrasi informasi dari citra secara otomatis. Dalam aplikasi otomasi industri, *computer vision* berfungsi sebagai sensor non-kontak yang mampu mengukur dan mengidentifikasi parameter visual suatu objek seperti warna, dimensi, dan posisi yang kemudian diproses sebagai landasan keputusan oleh sistem kendali. Kamera digital menangkap citra lingkungan fisik dan menerjemahkannya ke dalam sekuens matriks nilai intensitas piksel. Data mentah tersebut kemudian melalui tahapan *preprocessing* dan ekstrasi fitur untuk diinterpretasikan oleh sistem pemroses (seperti mikrokontroler atau mikrokomputer), sehingga dapat menjadi variabel masukan (*input*) bagi pengendalian aktuator fisik lebih lanjut [20].

2.7 Pengolahan Citra Digital dan Ekstrasi Fitur Warna

Pengolahan citra digital adalah proses manipulasi matriks data gambar menggunakan algoritma komputasi untuk menghasilkan atau menonjolkan informasi spesifik berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Nilai piksel pada citra digital mengandung informasi warna dalam format kanal tertentu yang kemudian diolah menjadi representasi numerik. Dalam konteks sistem otomasi pencampuran warna, ekstraksi fitur warna dilakukan dengan mengisolasi area pengamatan atau *Region Of Interest* (ROI) pada citra cairan cat. Sistem kemudian menghitung nilai rata-rata (*mean*) dari komponen warna pada ROI tersebut untuk dijadikan acuan numerik tunggal dalam mengevaluasi kedekatan hasil campuran terhadap target warna [21].

2.8 Representasi Warna RGB

Ruang warna RGB merupakan model warna aditif yang merepresentasikan visual melalui kombinasi tiga kanal warna primer cahaya: *Red* (Merah), *Green* (Hijau), dan *Blue* (Biru). Setiap piksel warna memiliki rentang intensitas digital (umumnya 8-bit, dengan nilai 0 hingga 255) yang menunjukkan besarnya kontribusi dari setiap kanal warna dasar. Representasi RGB sangat sederhana dan merupakan format *output* langsung (*native*) dari sebagian besar sensor digital seperti sensor CMOS pada kamera komersial dan modul kamera mikrokontroler. Namun, dalam konteks analisis *machine vision* yang membutuhkan kestabilan visual terhadap dinamika cahaya, model RGB sangat rentan. Hal ini disebabkan karena pada ruang RGB, informasi warna murni dan intensitas pencahayaan (luminansi) tergabung secara linier pada ketiga kanalnya. Mengakibatkan citra objek dengan warna cat yang identik dapat menghasilkan nilai RGB yang berbeda drastis ketika diamati dalam kondisi pencahayaan yang berfluktuasi [22].



Gambar 2.1 Representasi Warna RGB (*Red, Green, Blue*)

2.9 Ruang Warna HSV dan Transformasi RGB Terhadap HSV

Sebagai alternatif yang lebih tangguh terhadap fluktuasi pencahayaan, ruang warna HSV merepresentasikan warna melalui tiga parameter komponen terpisah: *Hue* (corak/nilai warna dominan), *Saturation* (kejenuhan / kemurnian warna), dan *Value* (kecerahan cahaya). Model ini lebih selaras dengan persepsi visual manusia.

Transformasi dari ruang warna RGB ke HSV sangat diperlukan untuk memisahkan informasi warna kromatik (*chrominance*) dari intensitas pencahayaan (*luminance*). Komponen *Hue* (H) dapat ditentukan dengan pendekatan geometris melalui perhitungan sudut θ yang diturunkan dari vektor RGB. Besaran sudut θ dihitung menggunakan persamaan 2.2 berikut:

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \right) \quad (2.2)$$

Nilai akhir *Hue* kemudian ditentukan berdasarkan posisi kanal biru terhadap hijau untuk memastikan rentang sudut berada pada 0° hingga 360° . Jika $B \leq G$, maka $H = \theta$, namun jika $B > G$, maka nilai $H = 360^\circ - \theta$. Penggunaan algoritma ini memungkinkan sistem untuk mengunci jenis warna cat (misal: Merah pada 0° atau Biru pada 240°) secara konsisten meskipun nilai *Intensity* atau *Value* berubah akibat fluktuasi lampu LED di sepenulis *mixing tank* [23].

2.10 Segmentasi Warna dan Perbandingan RGB Terhadap HSV

Segmentasi warna adalah teknik pemisahan objek target (*Region Of Interest*) dari latar belakang (*background*) yang tidak relevan di dalam citra. Penggunaan HSV dalam segmentasi jauh lebih adaptif dibandingkan RGB, karena mekanisme ambang batas (*thresholding*) dapat dilakukan hanya dengan mengunci parameter rentang *Hue* tertentu (misal: merah, biru, kuning) sambil memperlebar rentang toleransi untuk *Saturation* dan *Value*. Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Farhan menunjukkan bahwa segmentasi citra yang ditransformasi ke dalam domain HSV mampu mengekstraksi objek berwarna secara konsisten tanpa kehilangan akurasi klasifikasi ketika bayangan jatuh pada objek. Dengan segmentasi warna yang kokoh ini, arsitektur *cyber-physical system* pada mesin pencampuran cat dapat

mengevaluasi deviasi secara kontinu tanpa terdistraksi oleh faktor eksternal lingkungan manufaktur [24].

2.11 Perhitungan Jarak Warna Menggunakan *Euclidean Distance*

Dalam sistem kendali tertutup, variabel diperoleh dari perhitungan selisih antara nilai pembacaan sensor (*current value*) dengan nilai target (*setpoint*). Pada sistem visi, selisih ini direpresentasikan sebagai jarak geometris antara dua titik warna dalam ruang tiga dimensi HSV. Menurut N. Selvaras melalui penelitiannya pada tahun 2010, metode *Euclidean Distance* digunakan untuk menghitung jarak lurus antara dua koordinat warna guna menentukan besarnya deviasi (perbedaan) warna secara kuantitatif

Jika terdapat warna target (H1,S1,V1) dan warna hasil campuran (H2,S2,V2), maka besarnya deviasi warna ΔE dapat dirumuskan melalui rumus 2.3 dibawah ini:

$$\Delta E = \sqrt{(H_1 - H_2)^2 + (S_1 - S_2)^2 + (V_1 - V_2)^2} \quad (2.3)$$

Untuk menyederhanakan penulisan secara matematis, selisih antar komponen warna sering kali direpresentasikan menggunakan notasi Delta Δ yang melambangkan perbedaan antara dua titik:

$\Delta H = (H_1 - H_2)$ Merupakan selisih nilai *Hue*

$\Delta S = (S_1 - S_2)$ Merupakan selisih nilai *Saturation*

$\Delta V = (V_1 - V_2)$ Merupakan selisih nilai *Value*

Rumus tersebut bisa dituliskan juga secara ringkas sebagai:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta H^2 + \Delta S^2 + \Delta V^2}$$

Nilai ΔE yang dihasilkan merupakan parameter Tunggal yang merepresentasikan besarnya galat warna. Semakin kecil nilai ΔE , maka semakin mirip warna hasil pencampuran dengan warna target. Dalam perancangan ini, nilai ΔE akan menjadi input bagi algoritma *Proportional* untuk menentukan Langkah koreksi dosis pigmen hingga nilai ΔE mencapai batas toleransi yang ditetapkan [25].

2.12 Representasi Spektrum Warna Pada Ruang RGB dan HSV

Dalam sistem *computer vision*, pengenalan objek berbasis warna mengharuskan sistem komputasi untuk mengenali batasan nilai piksel secara matematis. Proses ini dilakukan dengan memetakan spektrum warna visual ke dalam rentang numerik tertentu sesuai dengan model ruang warna yang digunakan. Secara umum, terdapat 15 spektrum warna dasar yang sering dijadikan acuan dalam segmentasi citra digital. Untuk kebutuhan ekstraksi fitur warna pada penelitian ini, spektrum tersebut diklasifikasikan ke dalam dua model ruang warna utama, yaitu RGB (*Red, Green, Blue*) dan HSV (*Hue, Saturation, Value*) [26].

Pada model ruang warna RGB, setiap piksel direpresentasikan oleh kombinasi intensitas cahaya merah, hijau, dan biru dengan rentang nilai 8-bit, yaitu antara 0 hingga 255. Pendekatan ini merupakan standar dasar keluaran sensor kamera. Rentang nilai piksel RGB untuk 15 spektrum warna dasar dapat dilihat pada Tabel berikut.

Tabel 2.2 Rentang Spektrum 15 Warna RGB

Warna	<i>RED</i>	<i>Green</i>	<i>Blue</i>	Karakter
Merah	200-255	0-50	0-50	Dominan di kanal <i>red</i>
Kuning	200-255	200-255	0-50	Perpaduan maksimal antara <i>Red</i> dan <i>green</i>
Biru	0-50	0-50	200-255	Dominan di kanal <i>blue</i>
Ungu	100-200	0-50	100-255	Perpaduan antara <i>red</i> dan <i>blue</i> tanpa <i>green</i>
Hitam	0-50	0-50	0-50	Ketiga kanal mendekati nilai minimum (gelap)
Putih	200-255	200-255	200-255	Ketiga kanal mendekati nilai maksimum (terang)
VIOLET	96 – 113	103 – 121	123 – 133	
SKY	82 – 129	98 – 141	135 – 160	
BLUE				
ORANGE	151 – 161	146 – 160	140 – 156	

HIJAU	125 – 140	147 – 157	130 – 144
HIJAU ZAITUN	119 – 139	148 – 158	141 – 155

Meskipun RGB merupakan format bawaan perangkat keras, penggunaannya dalam segmentasi warna industri memiliki keterbatasan karena rentan terhadap fluktuasi cahaya. Oleh karena itu, spektrum warna tersebut juga dipetakan ke dalam model ruang warna HSV. Perlu dicatat bahwa implementasi pemrosesan citra pada penelitian ini menggunakan *library* OpenCV, di mana nilai kanal *Hue* (H) direntang ke dalam skala 0-179 untuk menyesuaikan batas memori komputasi 8-bit, sementara kanal *Saturation* (S) dan *Value* (V) tetap berada pada rentang 0-255. Pemetaan 15 spektrum warna dalam format parameter HSV OpenCV disajikan pada Tabel 2.2 di bawah ini:

Tabel 2.3 Spektrum 15 Warna HSV

Warna	HUE	Saturation	Value
Merah	0-10 & 160 – 179	50-255	50-255
Kuning	20-35	50-255	50-255
Biru	100-130	50-255	50-255
Ungu	130-160	50-255	50-255
Hitam	0-179	0-255	0-50
Putih	0-179	0-30	200-255
VIOLET	125-137	50-65	125-140
SKY BLUE	105-114	49-100	135-160
ORANGE	9-26	8-19	151-161
HIJAU	57-71	21-38	147-157
HIJAU ZAITUN	75-90	15-50	148-158

Berdasarkan pemetaan spektrum secara keseluruhan pada kedua tabel di atas, sistem otomasi manufaktur umumnya memprioritaskan warna-warna esensial yang paling sering digunakan dalam proses pencampuran. Oleh karena itu, meskipun

sistem mendefinisikan 15 spektrum warna sebagai landasan teoretis untuk menunjukkan luasnya cakupan deteksi algoritma, proses perancangan dan pengujian *Proportional* pada sistem ini akan difokuskan secara spesifik pada 5 warna utama, yaitu merah, kuning, biru, hitam, dan putih. Fokus pemrosesan pada keenam warna ini bertujuan untuk mengoptimalkan memori komputasi *master unit* (Raspberry Pi) dan memastikan kalibrasi aktuator pompa berjalan dengan presisi tinggi pada parameter target yang paling relevan dengan kebutuhan industri [27].

2.13 Konversi Pembacaan Massa *Load Cell* Menjadi Volume Berbasis Densitas Fluida

Dalam aplikasi industri otomasi pencampuran cat, formulasi resep maupun standar universal volume fluida umumnya dinyatakan dalam satuan mililiter (mL) atau sentimeter kubik (cm³). Namun, pada arsitektur sistem ini, pengukuran dan penakaran pigmen dilakukan secara gravimetrik berbasis massa murni (gram) menggunakan sensor *load cell* untuk menjaga presisi penakaran terhadap dinamika viskositas fluida.

Untuk melengkapi fungsionalitas otomasi agar hasil penakaran berbasis massa dapat ditranslasikan ke dalam besaran volume universal, diterapkan mekanisme konversi matematis berbasis nilai densitas (massa jenis) dari masing-masing cairan pigmen cat. Densitas (ρ) didefinisikan sebagai rasio antara massa (m) terhadap volume (V) suatu zat.

Secara matematis, persamaan hubungan densitas fluida dirumuskan melalui persamaan 2.4 dibawah ini:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.4)$$

Keterangan:

ρ = Densitas / massa jenis cat (g/mL atau g/cm³)

m = Massa cat hasil pembacaan *load cell* (gram)

V = Volume ekivalen cairan (mL)

Dengan menurunkan persamaan di atas, perhitungannya untuk mengonversi nilai massa aktual (m) dari *load cell* menjadi nilai volume (V) adalah:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2.4)$$

Melalui korelasi persamaan tersebut, fluktuasi perbandingan massa dan volume akibat variasi densitas masing-masing pigmen warna dasar (merah, kuning, biru, hitam, putih) dapat dikompensasi secara matematis. Hal ini memastikan bahwa penakaran berbasis gram pada aktuator fisik *load cell* tetap relevan dan presisi saat disandingkan dengan parameter formulasi cat berbasis volume di industri [28].

2.14 Sistem Kendali Tertutup (Closed – Loop Control System)

Sistem kendali tertutup merupakan sebuah mekanisme kontrol yang memanfaatkan umpan balik (*feedback*) untuk meminimalkan deviasi antara hasil aktual dengan target yang diinginkan. Dalam penelitian ini, sistem bekerja dengan membandingkan nilai warna target (*setpoint*) terhadap warna hasil pencampuran yang ditangkap oleh kamera. Selisih atau yang dihasilkan kemudian diproses oleh kontroler untuk menentukan aksi koreksi pada aktuator. Penggunaan sistem kendali tertutup sangat krusial untuk memastikan sistem tetap adaptif terhadap variabel lingkungan, seperti fluktuasi cahaya atau karakteristik pigmen cat yang tidak linear, sehingga proses pencampuran dapat mencapai hasil yang konsisten tanpa memerlukan intervensi manual.

2.15 Metode *Proportional* dan Standar Deviasi Untuk Koreksi Warna

Metode *Proportional* merupakan algoritma kontrol yang melakukan koreksi secara bertahap dengan menyesuaikan besaran *input* secara proporsional terhadap pada setiap iterasi. Dalam konteks pencampuran warna, jumlah pigmen yang harus ditambahkan (u) pada iterasi terhadap “K” dihitung berdasarkan perkalian antara konstanta proporsional (K_p) dengan galat warna (ΔE). Secara matematis persamaan yang digunakan dinyatakan melalui persamaan 2.5 dibawah ini:

$$u(k) = K_p \times \Delta E(k) \quad (2.5)$$

Keterangan:

$u(k)$ = Sinyal kendali atau massa pigmen tambahan pada iterasi ke K (Gram)

K_p = Konstanta Proporsional (penguatan sistem).

$\Delta E(k)$ = Galat warna (*Euclidean Distance*) yang terukur pada iterasi ke “K”

Proses ini dilakukan secara berulang (iteratif); setelah pigmen ditambahkan, sistem akan melakukan pengadukan dan pembacaan ulang untuk menghitung galat baru. Iterasi akan terus berlangsung hingga nilai ΔE mencapai konvergensi di bawah batas toleransi yang telah ditetapkan [29].

Data yang terkumpul kemudian dianalisis sebarannya menggunakan persamaan matematis Standar Deviasi (Simpangan Baku) sampel. Persamaan ini digunakan secara terpisah melalui persamaan 2.6 dibawah ini untuk masing-masing kanal H, S, dan V:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (2.6)$$

Keterangan:

s = Standar Deviasi (simpangan baku) yang merepresentasikan kestabilan.

N = Jumlah total pengambilan data citra.

x_i = Nilai kanal (H/S/V) pada pengambilan *frame* ke i .

$\bar{x}$ = Nilai rata-rata (*mean*) dari seluruh populasi pengambilan data [30].

2.16 Sistem *Dosing* Cairan dan Aktuator

Sistem *dosing* cairan pada Tugas Akhir ini terdiri dari pompa peristaltik sebagai aktuator utama untuk menyalurkan pigmen warna. Berbeda dengan sistem kontrol berbasis waktu, sistem ini mengintegrasikan sensor *load cell* yang dihubungkan dengan modul HX711 sebagai umpan balik massa secara *real-time*.

Penggunaan *load cell* memungkinkan pemantauan berat cairan yang dikeluarkan secara presisi, sehingga mampu mengeliminasi kesalahan takaran akibat perbedaan viskositas cairan atau penurunan kinerja pompa. Sinyal dari *load cell* diproses oleh mikrokontroler untuk memastikan bahwa volume pigmen yang keluar sesuai dengan kalkulasi algoritma proporsional [31].

2.17 Interaksi Sensor, Pengolahan, dan Aktuasi Dalam Arsitektur *Cyber – Physical System*

Interaksi antara sensor kamera, unit pemrosesan (Raspberry Pi dan Arduino), serta aktuator fisik membentuk sebuah ekosistem *Cyber-Physical System* (CPS). Dalam arsitektur ini, dunia fisik (warna cat dan berat cairan) direpresentasikan ke dalam data digital melalui sensor, diproses menggunakan algoritma komputasi (konversi HSV dan kalkulasi *Euclidean*), dan dikembalikan lagi ke dunia fisik melalui aksi kontrol aktuator secara *real-time*. Integrasi ini merupakan fondasi dari konsep *Smart Manufacturing*, di mana keputusan produksi diambil secara otonom berdasarkan data sensor untuk mencapai efisiensi bahan baku dan konsistensi kualitas produk [32].

2.18 Vs Code

Visual Studio Code (VS Code) adalah perangkat lunak penyunting kode sumber berbasis *open-source* yang dikembangkan oleh Microsoft. VS Code dirancang dengan arsitektur yang ringan namun memiliki fungsionalitas yang kuat melalui dukungan ekstensibilitas yang luas. Dalam pengembangan sistem berbasis *Cyber-Physical System* (CPS), VS Code berperan sebagai lingkungan pengembangan terpadu yang memungkinkan pemrograman multi-bahasa dalam satu *platform* [33]. Gambar *Visual Studio Code* ditunjukkan melalui gambar 2.2 dibawah ini



Gambar 2.2 *Visual Studio Code* [33].

2.19 Komponen Sistem

2.19.1 Raspberry Pi Modul B

Raspberry Pi 4 Model B merupakan sebuah komputer papan tunggal (*Single Board Computer / SBC*) berkinerja tinggi yang ditenagai oleh prosesor Broadcom BCM2711 Quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit. Berbeda dengan mikrokontroler standar, *Raspberry Pi* memiliki arsitektur komputasi yang mampu menjalankan sistem operasi penuh (berbasis Linux) sehingga sangat ideal untuk menangani komputasi tingkat tinggi secara *real-time*, seperti algoritma *machine learning* dan pemrosesan citra digital. Dalam arsitektur *Cyber-Physical System* (CPS) pencampuran cat, *Raspberry Pi 4* berfungsi sebagai *otak* komputasi utama (kontroler tingkat atas). Modul ini bertugas menerima data citra dari kamera, mengeksekusi konversi ruang warna RGB ke HSV, menghitung deviasi warna menggunakan metode *Euclidean Distance*, serta menjalankan algoritma *Proportional* sebelum mengirimkan perintah aktuasi ke mikrokontroler di lapisan fisik melalui komunikasi serial [34]. Gambar Raspbberry Pi 4 Model B ditunjukkan melalui gambar 2.3 dibawah ini



Gambar 2.3 Raspberry Pi 4 Model B [34].

Melalui gambar raspberry Pi 4 diatas, didapatkan spesifikasi melalui tabel 2.4 dibawah ini:

Tabel 2.4 Spesifikasi Raspberry PI 4B

Komponen	Spesifikasi
Prsesor	Broadcom BCM2712, Quad-core Arm Cortex- A76 64-bit @ 2.4 GHz
GPU	VideoCore VII (OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.2)

Memori (RAM)	LPDDR4X-4267 (opsi 1GB, 2GB, 4GB, 8GB, 16GB)
<i>Output Display</i>	Dual micro-HDMI, hingga 4Kp60 HDR
Video Decode	4Kp60 HEVC decoder
Konektivitas	Wi-Fi 802.11ac dual-band, <i>Bluetooth</i> 5.0 / BLE
USB	2× USB 3.0 (5Gbps), 2× USB 2.0
Jaringan	Gigabit Ethernet (PoE+ via HAT)
Penyimpanan	Slot microSD (mode SDR104 high speed)
Kamrea	2× MIPI 4-lane transceivers
Ekspansi	PCIe 2.0 x1 interface
GPIO	Header standar 40-pin
Catu Daya	5V DC via USB-C (Power Delivery), hingga 5A
Suhu Operasi	0°C – 70°C

2.19.2 Raspberry PI Camera Module V2 8Mp

Raspberry Pi Camera Module 3 adalah modul sensor penglihatan mutakhir yang dirancang untuk terintegrasi langsung dengan *Single-Board Computer* (SBC) Raspberry Pi melalui jalur antarmuka *Camera Interface* (CSI) berkecepatan tinggi. Modul ini ditenagai oleh sensor CMOS Sony IMX708 beresolusi 12 megapiksel yang dilengkapi dengan arsitektur back-illuminated serta *teknologi Phase Detection Autofocus* (PDAF). Dalam perancangan sistem kendali warna tertutup, kamera ini diimplementasikan sebagai sensor feedback visual utama yang dihadapkan ke dalam mixing tank guna mengakuisisi citra warna cat secara iteratif. Kehadiran motor autofocus pada modul ini memberikan keunggulan teknis yang krusial, karena sensor mampu secara dinamis mengkompensasi dan mempertahankan ketajaman fokus matriks piksel secara otomatis meskipun terjadi fluktuasi elevasi permukaan cairan cat di dalam tangki setiap kali aktuatur selesai menambahkan

massa pigmen [35]. Gambar Raspbbery Pi Camera Module V3 ditunjukkan melalui gambar 2.4 dibawah ini



Gambar 2.4 *Raspbbery Pi Camera Module V3* [35].

Melalui gambar *Raspbbery Pi Camera V3* diatas, didapatkan spesifikasi melalui tabel 2.5 dibawah ini:

Tabel 2.5 Spesifikasi *Raspbbery Pi Camera V3*

Komponen	Spesifikasi
Sensor	<i>Sony IMX708 stacked, back-illuminated CMOS (12 MP)</i>
<i>Still Resulition</i>	4608 × 2592 pixels
<i>Video Modes</i>	1080p30, 720p60, and 640x480p90
<i>Focus</i>	<i>Fixed Focus</i>
<i>Dimensions</i>	25 × 24 × 11.5 mm
<i>Weight</i>	3g
<i>Interface</i>	15-pin CSI <i>connector</i>
<i>Lens Focal Length</i>	4.74 mm +- 0.01
<i>Field of View (Diagonal)</i>	75 °

2.19.3 Arduino Mega Pro Mini

Arduino Mega Pro Mini atau sering disebut Mega 2560 PRO) adalah papan mikrokontroler berukuran ringkas yang berbasis pada *chip* ATmega2560. Meskipun memiliki dimensi fisik yang lebih kecil dari Arduino Mega standar, modul ini tetap

mempertahankan jumlah pin *Input/Output* (I/O) yang sama, yaitu 54 pin I/O digital (termasuk 15 pin PWM) dan 16 pin masukan analog. Kapasitas memori *flash* sebesar 256 KB menjadikannya sangat mumpuni untuk mengeksekusi program kendali yang panjang. (Dalam sistem yang dirancang, Arduino Mega *Pro Mini* bertindak sebagai kontroler lapisan fisik (aktuasi tingkat rendah). Mikrokontroler ini bertugas menerima perintah dosis cairan dari *Raspberry Pi*, membaca umpan balik massa secara presisi dari sensor *load cell* (via modul HX711), serta mengendalikan putaran motor pompa peristaltik dan *solenoid valve* menggunakan sinyal PWM [36]. Gambar Arduino Mega Pro Mini ditunjukkan melalui gambar 2.5 di bawah ini



Gambar 2.5 Arduino Mega Pro Mini [36].

Melalui gambar Arduino Mega Pro Mini diatas, didapatkan spesifikasi melalui tabel 2.6 dibawah ini:

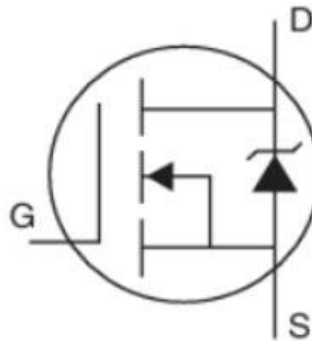
Tabel 2.6 Spesifikasi Arduino Mega Pro Mini

Komponen	Spesifikasi
<i>Microcontroller</i>	Atmega2560
Tegangan operasi	5V
Tegangan Input (disarankan)	7-12V
Tegangan Input (batas)	6-20V
Digital I/O	54 PIN
PWM digital I/O	15 PIN
Input analog	16 PIN

Arus DC per pin I/O	20mA
Arus DC pin 3.3V	50Ma
<i>Flash memory</i>	256 KB
SRAM	8KB
EEPROM	4 KB
Kecepatan <i>Clock</i>	16 MHz
LED	Pin 13
Dimensi	101,52 x 53,3 mm
Berat	37 gram
Tegangan Input (batas)	6-20 V

2.19.4 Mosfet IRLZ44N

MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) adalah komponen semikonduktor daya yang berfungsi sebagai sakelar elektronik (*switching*) berkecepatan tinggi. Seri IRLZ44N merupakan jenis *logic-level N-Channel MOSFET*. Berbeda dengan MOSFET standar yang membutuhkan tegangan gerbang (*gate*) tinggi untuk aktif penuh, tipe *logic-level* dirancang khusus agar dapat mencapai saturasi penuh (konduksi maksimal) hanya dengan sinyal logika 5V dari pin digital mikrokontroler. Karena pin mikrokontroler seperti *Arduino* tidak mampu menyuplai arus besar, IRLZ44N diimplementasikan sebagai komponen *driver* (penguat arus) yang menjembatani mikrokontroler dengan aktuator berdaya tinggi. Sinyal kontrol bertegangan rendah dari *Arduino* akan memicu gerbang MOSFET, yang kemudian mengalirkan arus dari sumber daya 12V DC untuk menggerakkan pompa peristaltik dan *solenoid valve* secara presisi [37]. Gambar skematik MOSFET-N ditunjukkan melalui gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.6 simbol skematik MOSFET N-channel [37].

Melalui gambar skematik MOSFET N diatas, didapatkan spesifikasi melalui tabel 2.7 dibawah ini:

Tabel 2.7 Spesifikasi Mosfet IRLZ44N

Komponen	Spesifikasi
Tipe MOSFET	N-Channel
V_{DS} (Drain – Source Voltage)	55V
I_D (Drain Current)	47A
$V_{GS(th)}$	1-2V
Gate Drive Optimal	4-5V
$R_{DS(ON)}$	$\approx 0.022 \Omega$
Power Dissipation (P_d)	$\pm 94 \text{ W}$
Gate-Source Voltage Max	$\pm 16V$
Switching Speed	Fast
Body Diode	Available
Package	TO-220

2.19.5 Load Cell 10 Kg dan Modul HX711

2.19.5.1 Load Cell

Load cell tipe strain gauge umumnya menggunakan konfigurasi jembatan Wheatstone dengan empat strain gauge untuk meningkatkan sensitivitas dan mengurangi pengaruh suhu. Sebagian gauge bekerja dalam kondisi tarik dan sebagian lainnya dalam kondisi tekan, sehingga perubahan resistansi akibat

temperatur dapat saling mengompensasi. Pendekatan ini menjadikan load cell dapat menghasilkan pengukuran yang stabil dan akurat meskipun terjadi variasi suhu lingkungan. Load cell bekerja dengan prinsip deformasi elastis, di mana gaya yang diberikan menghasilkan perubahan bentuk yang sangat kecil pada elemen struktural. Perubahan ini kemudian diterjemahkan menjadi perubahan tegangan listrik pada rangkaian jembatan. Besarnya sinyal keluaran sangat kecil (dalam orde millivolt per volt), sehingga diperlukan rangkaian penguat dan konverter analog-ke-digital untuk memproses sinyal menjadi data berat yang dapat dibaca oleh sistem mikrokontroler [38]. Gambar *load cell* ditunjukkan melalui gambar 2.7 di bawah ini



Gambar 2.7. Loadcell [38].

Berdasarkan spesifikasi teknis, load cell memiliki kapasitas pengukuran hingga 5 kg dengan tingkat presisi sepenulir 0,05% dari skala penuh. Sensor ini dirancang untuk memberikan respon linier terhadap beban, dengan kesalahan non-linearitas, histeresis, dan non-repeatability yang sangat kecil,

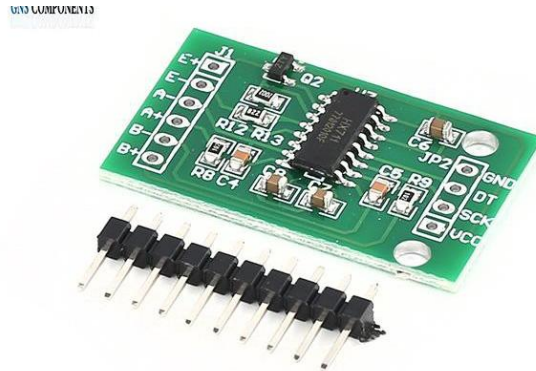
Berikut merupakan spesifikasi Loadcell menurut *datasheet*

Tabel 2. 8 Spesifikasi Loadcell

Komponen	Spesifikasi
<i>Housing Material</i>	<i>Aluminum Alloy</i>
Tegangan	5V DC
Kapasitas	10 & 5 Kg
Dimensi	55.25x12.7x12.7mm
Ukuran Kabel	30 AWG (0.2mm)
<i>Mounting Holes</i>	M5 (Screw Size)

2.18.5.2 Modul HX711

Modul HX711 merupakan penguat sinyal dan konverter analog-ke-digital (ADC) beresolusi tinggi yang dirancang khusus untuk sistem penimbangan digital menggunakan sensor jembatan Wheatstone seperti load cell. Modul ini memperkuat sinyal diferensial berlevel sangat kecil dari load cell dan mengubahnya menjadi data digital sehingga dapat diproses oleh mikrokontroler [39]. Gambar modul HX711 ditunjukkan melalui gambar 2.8 di bawah ini



Gambar 2.8 Modul HX711 [39].

HX711 memiliki ADC 24-bit dengan penguat diferensial internal yang dapat membaca perubahan sinyal kecil secara akurat. Modul ini bekerja dengan tegangan operasi rendah dan mampu menghasilkan pembacaan data yang konsisten, sehingga banyak digunakan pada aplikasi timbangan digital dan sistem pengukuran massa presisi. Dalam penggunaannya, HX711 menerima sinyal analog dari load cell, memperkuatnya, kemudian mengirimkan data digital ke mikrokontroler melalui antarmuka dua jalur. Data keluaran selanjutnya dikalibrasi untuk dikonversi menjadi nilai massa yang sebenarnya.

Spesifikasinya adalah seperti berikut ini:

- Differential input voltage: $\pm 40\text{mV}$ (Full-scale differential input voltage $\pm 40\text{mV}$)
- Data accuracy: 24 bit (24 bit A / D converter chip.)
- Refresh frequency: 80 Hz
- Operating Voltage : 5V DC
- Operating current : $<10\text{ mA}$
- Size: 38mm*21mm*10mm.

2.18.5.3 Kalibrasi dan Konversi Pembacaan Load Cell

Kalibrasi load cell dilakukan untuk mengubah data RAW dari modul HX711 menjadi nilai massa dalam satuan gram. Proses kalibrasi diperlukan karena nilai RAW yang dihasilkan HX711 tidak secara langsung menunjukkan berat sebenarnya. Nilai RAW tanpa beban digunakan sebagai offset, sedangkan nilai RAW saat diberi beban standar digunakan untuk menentukan faktor kalibrasi. Faktor kalibrasi dapat dihitung menggunakan persamaan 2.7 berikut:

$$Faktor\ Kalibrasi = \frac{RAW_{beban} - RAW_0}{Beban} \quad (2.7)$$

Keterangan:

- RAW bebana adalah nilai RAW HX711 ketika load cell diberi beban standar,
- RAW 0 adalah nilai RAW HX711 ketika load cell tanpa beban,
- Beban adalah massa beban standar dalam satuan gram.

Setelah faktor kalibrasi diperoleh, nilai RAW dapat dikonversi menjadi berat menggunakan persamaan 2.8 berikut:

$$Berat = \frac{RAW - Offset}{Faktor\ Kalibrasi} \quad (2.8)$$

Keterangan:

- Berat adalah hasil pembacaan massa dalam satuan gram,
- Raw adalah data mentah yang terbaca dari HX711,
- Offset adalah nilai RAW pada kondisi tanpa beban,
- Faktor Kalibrasi adalah nilai hasil perhitungan kalibrasi.

Pada sistem ini, proses kalibrasi digunakan agar pembacaan massa dari load cell dapat menjadi dasar pengendalian proses pencampuran cat. Setelah data RAW dikonversi menjadi satuan gram, nilai massa tersebut dapat digunakan untuk menentukan apakah pompa tetap aktif, diperlambat, atau dihentikan sesuai target massa yang telah ditentukan.

Untuk mengevaluasi hasil kalibrasi, digunakan nilai error pembacaan. Error menunjukkan besar penyimpangan antara berat terbaca dan beban asli. Persamaan error dituliskan melalui persamaan 2.9 sebagai berikut:

$$Error(\%) = \frac{| \text{Beban Asli} - \text{Berat Terbaca} |}{\text{Beban Asli}} \times 100\% \quad (2.9)$$

Nilai error yang semakin kecil menunjukkan bahwa pembacaan load cell semakin mendekati beban asli. Oleh karena itu, perhitungan error digunakan sebagai dasar untuk menilai akurasi hasil kalibrasi sensor load cell.

2.19.6 Pompa Diafragma 12 V

Pompa diafragma 12 Volt DC dengan kuat arus 3.5 Ampere serta tekanan maksimal 100 PSI diimplementasikan sebagai aktuator terminal (*discharge actuator*) pada tahap penyelesaian sistem pencampuran. Pompa ini beroperasi berdasarkan prinsip perpindahan positif (*positive displacement*) di mana pergerakan mekanis bolak-balik dari membran fleksibel digunakan untuk menciptakan kevakuman hisap dan gaya dorong bertekanan dalam bilik pompa. Pemilihan dan penggunaan pompa diafragma ini didasarkan pada karakteristik fisik cairan cat yang memiliki viskositas (kekentalan) serta densitas yang tinggi. Berbeda dengan *solenoid valve* konvensional yang mengandalkan gaya gravitasi murni dan rentan mengalami penyumbatan (*clogging*) atau aliran yang lambat, tekanan dorong tinggi mencapai 100 PSI pada pompa diafragma mampu mengatasi hambatan viskositas fluida kental. Mekanisme ini memastikan proses pengurasan (*drainase*) hasil campuran cat dari *mixing tank* menuju wadah penampung akhir dapat berlangsung secara cepat, tuntas, dan konstan tanpa meninggalkan sisa endapan yang berpotensi memengaruhi volume produk maupun mengganggu higienitas siklus pencampuran berikutnya. Gambar Pompa Diafragma 12 Volt ditunjukkan melalui gambar 2.9 dibawah ini



Gambar 2.9 Pompa Diafragma 12 Volt [40].

Kapasitas tekanan tinggi yang mencapai 100 PSI menjadikan pompa ini sangat andal dalam menangani fluida yang memiliki tingkat densitas dan viskositas tinggi seperti cairan cat, sehingga mampu menghasilkan laju aliran pembuangan (*drainase*) yang konstan serta meminimalisasi risiko penyumbatan (*clogging*) pada jalur perpipaan. Dengan profil konsumsi daya elektrik sepenulir 25 Watt, penggerak motor pompa ini dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino melalui antarmuka modul *mosfet* berkapasitas arus memadai, yang memungkinkan sistem untuk mengeksekusi pengurasan hasil cat dari dalam *mixing tank* menuju wadah eksternal secara otomatis dan tuntas sesaat setelah target konvergensi warna tercapai.

Melalui gambar 2.9 diatas didapatkan spesifikasi Pompa Diafragma melalui tabel 2.9 di bawah ini:

Tabel 2.9 Spesifikasi Pompa Diafragma

Komponen	Spesifikasi
<i>Voltage</i>	12V DC
<i>Pressure</i>	100 PSI
<i>Current Draw</i>	3.5 A
<i>Watt</i>	22 W
<i>Feature</i>	<i>Auto Cut-Off</i>

2.18.8 Lampu LED - *Strip* 5Volt DC

Lampu LED *Strip* DC 3-5 Volt merupakan modul fleksibel lampu LED untuk beroperasi langsung pada rentang tegangan rendah mulai dari 3 hingga 5 Volt DC, sehingga sangat kompatibel untuk ditenagai menggunakan baterai isi ulang *lithium-ion 18650* maupun sumber daya portabel seperti *powerbank*. Penggunaan LED berukuran besar memberikan intensitas cahaya dengan pancaran rona warna yang tajam, sehingga visual keberadaan cat tetap terlihat jelas meskopun dengan jarak jauh [41]. Lampu LED *Strip* 5 Volt DC ditunjukkan melalui gambar 2.10 di bawah ini



Gambar 2.10 Lampu LED *Strip* 5Volt [41].

2.18.7 Resistor

Resistor merupakan komponen elektronika pasif yang berfungsi menghambat atau membatasi aliran arus listrik dalam suatu rangkaian. Komponen ini bekerja dengan menghasilkan penurunan tegangan di antara kedua terminalnya sehingga arus yang mengalir dapat dikendalikan sesuai kebutuhan rangkaian. Nilai hambatan resistor dinyatakan dalam satuan ohm (Ω), yang menunjukkan besarnya resistansi terhadap arus Listrik, serta Gambar Resistor ditunjukkan melalui gambar 2.11 di bawah ini



Gambar 2.11 Resistor [42].

Nilai resistansi pada resistor umumnya ditunjukkan melalui kode warna gelang pada badan resistor. Kombinasi warna tersebut memiliki nilai hambatan dan toleransi yang menentukan batas penyimpangan nilai resistansi. Perbedaan nilai hasil perhitungan dan pengukuran dapat terjadi karena toleransi resistor, kondisi komponen, serta ketelitian alat ukur yang digunakan [42].