

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Gambaran Umum Hasil Perancangan

Hasil perancangan yang telah dilakukan dalam perancangan ini direalisasikan menjadi sebuah sistem koreksi dan pencampuran warna cat otomatis yang bekerja secara tertutup (*closed-loop control*), dengan mengintegrasikan perangkat keras dan perangkat lunak. Sistem ini membagi beban kerja komputasi pada dua pusat kendali yaitu: Raspberry Pi 4 Model B yang dipadukan dengan Raspberry Pi Camera Module 3 sebagai subsistem pengolah visi computer, serta Arduino Mega Pro Mini sebagai mikrokontroler aktuator. Perangkat keras mekanis yang digunakan meliputi pompa peristaltic sebagai aktuator injeksi pigmen dasar, *Load cell* sebagai sensor umpan balik pengukuran massa actual, motor pengaduk (*Mixer*), serta pompa diafragma 12V, 3,5A sebagai aktuator pengeluaran hasil cat (*drainase*).

Setelah setiap komponen direalisasikan dan diintegrasikan, sistem mampu melaksanakan siklus otomatis yang utuh: mulai dari pembacaan citra warna cairan, kalkulasi deviasi warna menggunakan metode jarak *Euclidean HSV*, eksekusi penakaran cat secara presisi berdasarkan massa, hingga pengadukan. Proses ini berlangsung secara berulang (*Proportional*) hingga warna campuran mencapai target konvergensi, yang kemudian diakhiri dengan pengurasan cat menuju wadah eksternal menggunakan pompa diafragma. Selanjutnya, dilakukan pengujian terhadap setiap bagian sistem untuk mengevaluasi kinerja, akurasi pembacaan optic, dan keandalan respons kendali yang telah dirancang.

4.2 Hasil Realisasi Gui Perangkat Lunak

Subbab ini membahas hasil realisasi perangkat lunak yang diimplementasikan untuk menjalankan alur logika otomatis sistem koreksi warna cat. Karena menggunakan arsitektur dua pusat kendali, perangkat lunak direalisasikan ke dalam dua ruang lingkup fungsional. Pada sisi mikrokomputer (*Raspberry PI*), program dibangun untuk mengakuisisi citra optic secara *real-time*, melakukan pemotongan area fokus (*Region of Interest*), menerapkan algoritma toleransi

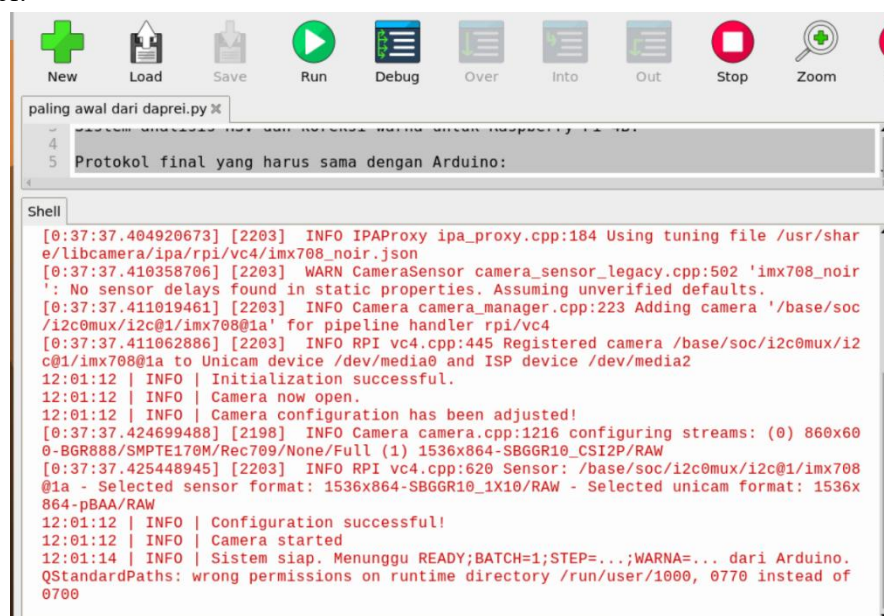
iluminasi adaptif untuk memitigasi pantulan cahaya lingkungan, serta melakukan perhitungan besaran koreksi gramasi.

Pada sisi mikrokontroler (Arduino), perangkat lunak direalisasikan untuk *memparsing* protocol data dari komunikasi serial UART, mengakuisisi data massa mekanis dari *Load Cell* secara presisi, serta mengeksekusi logika kendali proporsional terhadap mosfet dan penggerak motor. Hal ini mencakup urutan penyalaan motor pengaduk, durasi putaran pompa peristaltik, hingga pemicuan akhir pada pompa diafragma Ketika proses sudah dinyatakan berhasil

4.3 Pengujian Fungsionalitas Subsistem

4.3.1 Pengujian inialisasi Kamera

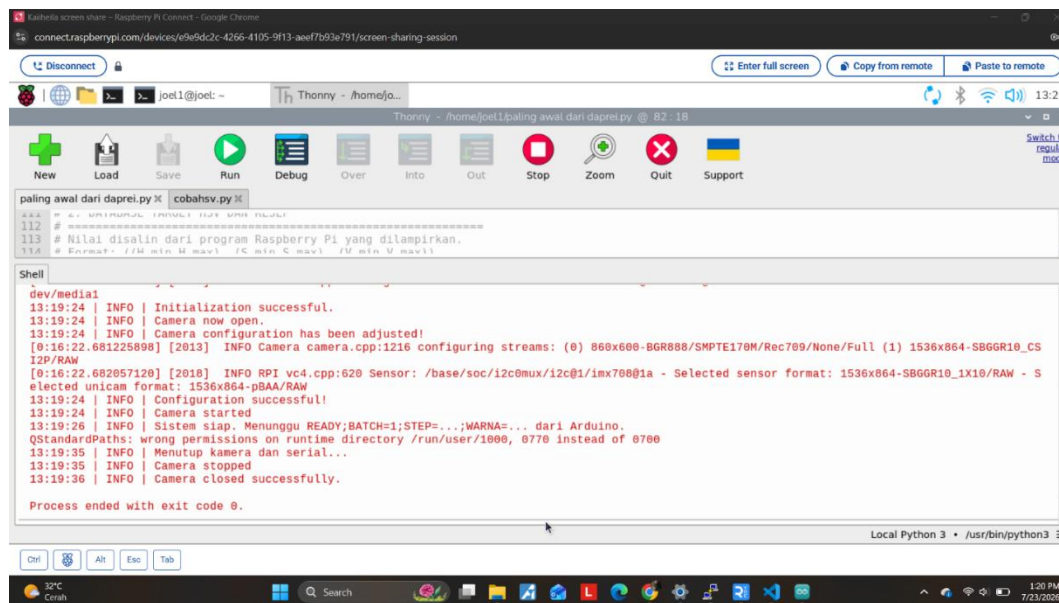
Pengujian pada subbab ini bertujuan untuk memvalidasi keberhasilan jalinan komunikasi aliran data dua arah antara Raspberry Pi, dan Arduino Mega Pro Mini. Komunikasi ini berjalan melalui antarmuka USB Serial (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) dengan kecepatan transmisi (*baud rate*) 115200 bps. Serta keberhasilan inialisasi perangkat keras modul kamera juga diformat khusus (BGR888). Keberhasilan tahap ini ditandai dengan stabilnya permukaan perangkat (*port*) pada mikrokomputer, keberhasilan modul membuka antarmuka video, serat pengakhiran komunikasi (*graceful exit*) yang aman tanpa menyebabkan port terkunci.



```

[0:37:37.404920673] [2203] INFO IPAProxy ipa_proxy.cpp:184 Using tuning file /usr/share/libcamera/ipa/rpi/vc4/imx708_noir.json
[0:37:37.410358706] [2203] WARN CameraSensor camera_sensor_legacy.cpp:502 'imx708_noir': No sensor delays found in static properties. Assuming unverified defaults.
[0:37:37.411019461] [2203] INFO Camera camera_manager.cpp:223 Adding camera '/base/soc/i2c0mux/i2c@1/imx708@1a' for pipeline handler rpi/vc4
[0:37:37.411062886] [2203] INFO RPi vc4.cpp:445 Registered camera /base/soc/i2c0mux/i2c@1/imx708@1a to Unicam device /dev/media0 and ISP device /dev/media2
12:01:12 | INFO | Initialization successful.
12:01:12 | INFO | Camera now open.
12:01:12 | INFO | Camera configuration has been adjusted!
[0:37:37.424699488] [2198] INFO Camera camera.cpp:1216 configuring streams: (0) 860x600-BGR888/SMPTE170M/Rec709/None/Full (1) 1536x864-SBGGR10_CSI2P/RAW
[0:37:37.425448945] [2203] INFO RPi vc4.cpp:620 Sensor: /base/soc/i2c0mux/i2c@1/imx708@1a - Selected sensor format: 1536x864-SBGGR10_1X10/RAW - Selected unicam format: 1536x864-pBAA/RAW
12:01:12 | INFO | Configuration successful!
12:01:12 | INFO | Camera started
12:01:14 | INFO | Sistem siap. Menunggu READY;BATCH=1;STEP=...;WARNA=... dari Arduino.
QStandardPaths: wrong permissions on runtime directory /run/user/1000, 0770 instead of 0700
  
```

Gambar 4.1 Inisialisasi komunikasi berhasil



Gambar 4.2 Camera closed successfully

4.3.2 Protokol Komunikasi Serial

Pada sistem yang telah terintegrasi dengan aktuator, Arduino berperan sebagai secara kontinu, dengan mengirimkan data serial berupa log status perangkat keras kepada Raspberry Pi sebagai *master* melalui protokol komunikasi UART. Data yang dikirim meliputi status proses, informasi batch, serta Riwayat pergerakan aktuator selama proses pencampuran berlangsung. Selama proses pengujian, Raspberry Pi mampu menerima seluruh data secara konsisten dengan *latency* sependek 3 detik pada setiap siklus tanpa kehilangan data maupun kesalahan pembacaan.

Keberhasilan mekanisme *parsing* ini memberikan informasi serta jaminan bahwa transmisi data pada jalur *serial* tidak memicu beban komputasi berlebih (*overhead*) pada perangkat lunak Raspberry Pi. Dengan mengisolasi *trigger* secara spesifik (data yang dikirimkan), sistem dapat mensinkronkan jeda waktu antara penyelesaian siklus mekanis serta mulainya inspeksi visual secara presisi. Ketahanan pengelolaan *buffer* tersebut memastikan alur eksekusi berbasis kejadian (*event-driven*) berjalan stabil tanpa adanya instruksi yang terlewat, sehingga menjamin kontinuitas proses pencampuran warna dari awal hingga mencapai status ekuilibrium.

```

SELESAI_PENGUJIAN_READY
Pengujian READY selesai.
READY;NO=1;BATCH=1;STEP=MIXING_AWAL
Data READY berhasil disimpan (di Arduino)
Waktu tunggu: 3000 ms
-----
READY;NO=2;BATCH=1;STEP=MIXING_AWAL
Data READY berhasil disimpan (di Arduino)
Waktu tunggu: 3014 ms
-----
READY;NO=3;BATCH=1;STEP=MIXING_AWAL
Data READY berhasil disimpan (di Arduino)
Waktu tunggu: 3012 ms
-----
READY;NO=4;BATCH=1;STEP=MIXING_AWAL
Data READY berhasil disimpan (di Arduino)
Waktu tunggu: 3014 ms
-----
READY;NO=5;BATCH=1;STEP=MIXING_AWAL
Data READY berhasil disimpan (di Arduino)
Waktu tunggu: 3014 ms
-----
SELESAI_PENGUJIAN_READY
Pengujian READY selesai.

```

Gambar 4.3 Insialisasi Komunikasi Arduino Terhadap Raspberry Pi

Pengujian ini juga mengevaluasi kemampuan perangkat lunak Raspberry Pi dalam melakukan parsing terhadap aliran data serial yang masuk secara terus menerus. Hasil pengujian menunjukkan bahwa algoritma berhasil menyaring data yang relevan dengan mengabaikan *log* yang tidak berkaitan, seperti informasi driver motor BTS7960 maupun proses *dosing*, dan hanya merespons paket data pemicu (*trigger*) tertentu, seperti `READY;NO=x;BATCH=1;STEP=MIXING_AWAL`. Mekanisme ini membuktikan bahwa sistem memiliki tingkat *robustness* yang baik dalam mengelola komunikasi serial, sehingga mampu meminimalkan risiko *buffer overflow*, kesalahan pembacaan data, maupun eksekusi algoritma *computer vision* sebelum proses mekanis benar-benar selesai.

```

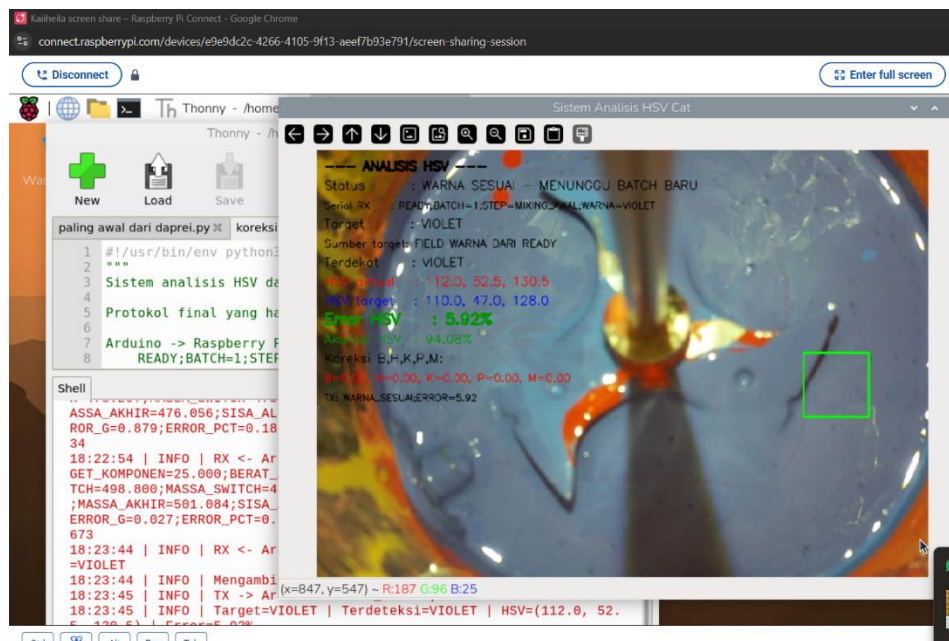
Shell
>>> %Run READYMIXING.py
Raspberry Pi siap membaca data READY dari Arduino...
Menunggu data serial...
Data diterima: READY;NO=1;BATCH=1;STEP=MIXING_AWAL
Data READY berhasil disimpan
Waktu tunggu: 8899.9 ms
-----
Data diterima: READY;NO=2;BATCH=1;STEP=MIXING_AWAL
Data READY berhasil disimpan
Waktu tunggu: 2999.62 ms
-----
Data diterima: READY;NO=3;BATCH=1;STEP=MIXING_AWAL
Data READY berhasil disimpan
Waktu tunggu: 3000.0 ms
-----
Data diterima: READY;NO=4;BATCH=1;STEP=MIXING_AWAL
Data READY berhasil disimpan
Waktu tunggu: 2990.46 ms
-----
Data diterima: READY;NO=5;BATCH=1;STEP=MIXING_AWAL
Data READY berhasil disimpan
Waktu tunggu: 2993.52 ms
-----
Data diterima: SELESAI_PENGUJIAN_READY
Pengujian READY selesai.
File hasil: pengujian_ready_tanpa_ack.csv
>>>

```

Gambar 4.4 Parsing Data Serial Berhasil Antara Aruino Dengan Raspberry

4.4 Inisialisasi Fungsionalitas Antarmuka Pemantauan (*Live Preview*) dan *Spatial Filtering (ROI)*

Pengujian Antarmuka Pemantauan (*Live Preview*) dan *Spatial Filtering (ROI)* Pemantauan operasional visual merupakan aspek penting untuk kelayakan interaksi manusia dan mesin (HMI) pada otomasi. Pada bagian ini dibahas efektivitas mode *Live Preview* yang memungkinkan antarmuka grafis (GUI) berjalan memperbarui *frame* secara asinkron tanpa memblokir antrean komunikasi serial. Lebih lanjut, dibuktikan pula keberhasilan teknik pemotongan area fokus atau *Region of Interest (ROI)* dalam menyingkirkan derau visual dari latar belakang. Sistem secara akurat mampu membatasi piksel yang diolah (*Spatial Filtering*) hanya pada area geometri wadah cairan cat, mengabaikan objek lain di luar kotak inspeksi. Pengujian antarmuka (*live Preview*) dan *Spatial Filtering* berbasis ROI dilakukan untuk memvalidasi perfoma visualisasi interaksi manusia dan HMI (*Human-Machine Interface*) serta akurasi isolasi pemrosesan citra. Pengujian mode *Live Preview* dinyatakan berhasil melalui validasi *frame visual* dan *overlay data tekstual*, dalam pembahasan ini divalidasi melalui variabel HSV aktual, target, serta persentase tingkatan *Error*) secara *real-time* tanpa menginterupsi komunikasi serial. Stabilitas tersebut mengonfirmasi bahwa pemrosesan grafis secara asinkron berhasil menjaga fleksibilitas antarmuka pengguna tanpa adanya pendundaan (*latency*)



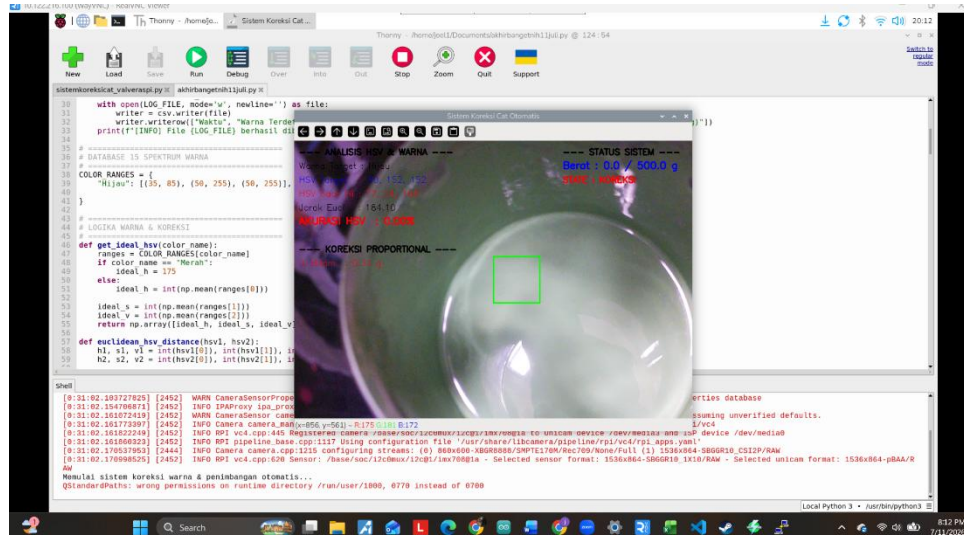
Gambar 4.5 *Spatial Filtering*

Berdasarkan gambar diatas (4.5) keberhasilan *Spatial Filtering (ROI)* divalidasi secara kuantitatif melalui pengisolasian area komputasi nilai HSV pada *Bounding Box* (area hijau kotak) dalam wilayah sampel fluida cat. Metode ini terbukti secara presisi mampu mengeliminasi 100% *noise* visual yang berasal dari objek non-target, seperti *mixer*, pantulan cahaya acak, serta batas pinggir wadah. Dengan membatasi matrix *pixel* yang dihitung hanya pada area target ROI tersebut, sistem berhasil menghasilkan data HSV Aktual (112.0, 52.5, 130.5) yang stabil dan representatif, yang kemudian digunakan oleh algoritma untuk menetapkan status konvergensi warna (*Error HSV: 5.92%*).

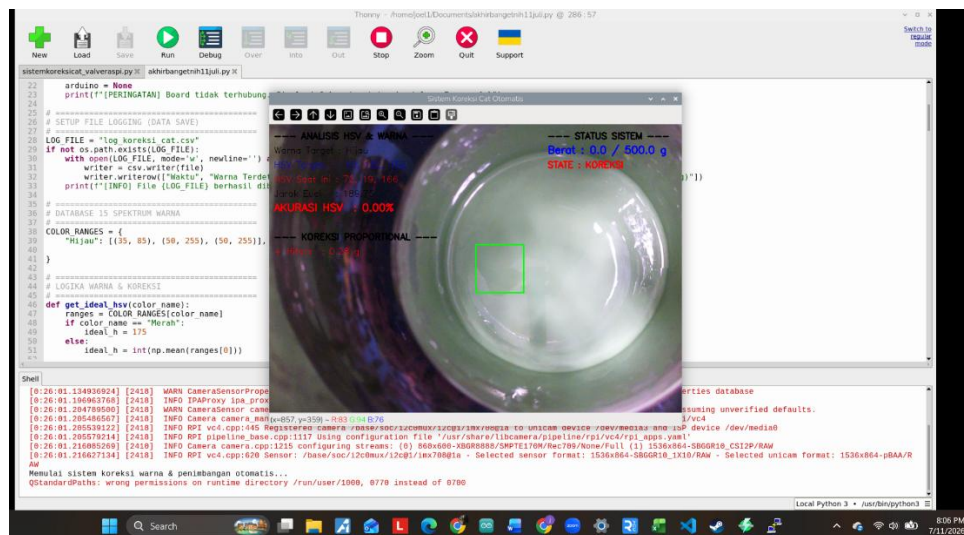
4.5 Penujian Pengaruh INTensitas Cahaya dan Posisi Visual Terhadap Stabilitas Ruang Warna

Pada tahap pengujian awal, sistem secara teknis dapat dan berhasil melakukan pembacaan nilai piksel pada ROI dengan baik. Namun memiliki nilai *error* yang tinggi dan hal tersebut dipengaruhi oleh jarak *Euclidean* yang terdeteksi bukan disebabkan oleh kegagalan algoritma, namun diperoleh fkato pantulan specular pada permukaan cat yang bersifat cair. Permukaan fluida bertindak menyerupai cermin, variasi intensitas pencahayaan lingkungan dan sorotan cahaya di sekitar alat memantul langsung ke arah lensa kamera. Titik-titik pantulan cahaya ini

menutupi pigmentasi asli dari cairan cat, sehingga piksel yang diekstrak oleh sistem merupakan representasi dari pantulan cahaya putih, bukan warna asli dari campuran cat tersebut.



Gambar 4.6 Percobaan Warna Cat Hijau Dengan Cahaya yang Divariasikan



Gambar 4.7 Percobaan Warna Cat Hijau Dengan Cahaya yang Divariasikan Serta Perpindahan Target ROI

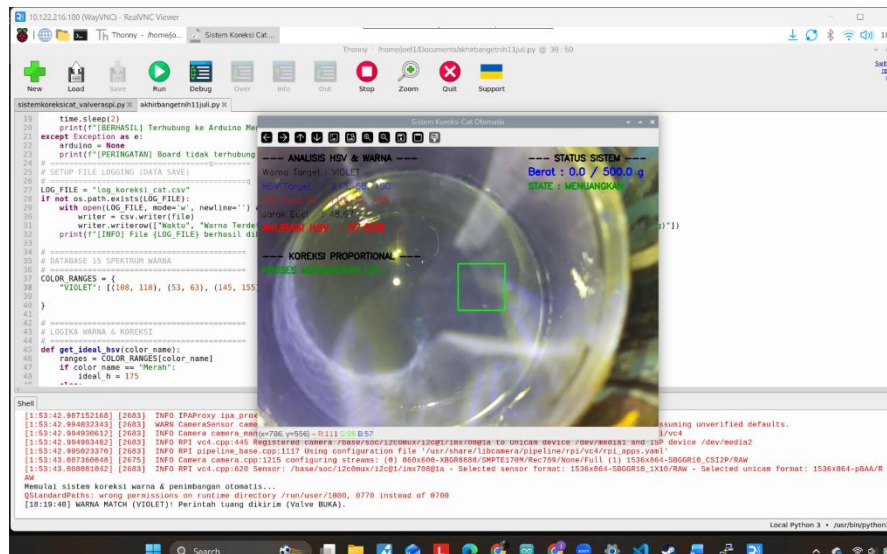
The screenshot displays a Windows 10 desktop with a taskbar at the bottom. The active window is a code editor showing a Python script named `skribabangenh11july.py`. The script is designed to connect to an Arduino Mega Pro Mini via a serial port, receive HSV data, and process it. It includes comments in Indonesian and logic for logging data, setting up a color range for 'Granny' (red), and applying corrections. A green box highlights the `def get_idal_hsv` function.

Overlaid on the code editor is a camera feed window titled `Stream Koneksi Cal Otomatis`. The feed shows a close-up of a red, textured object. Text overlays on the camera feed provide the following information:

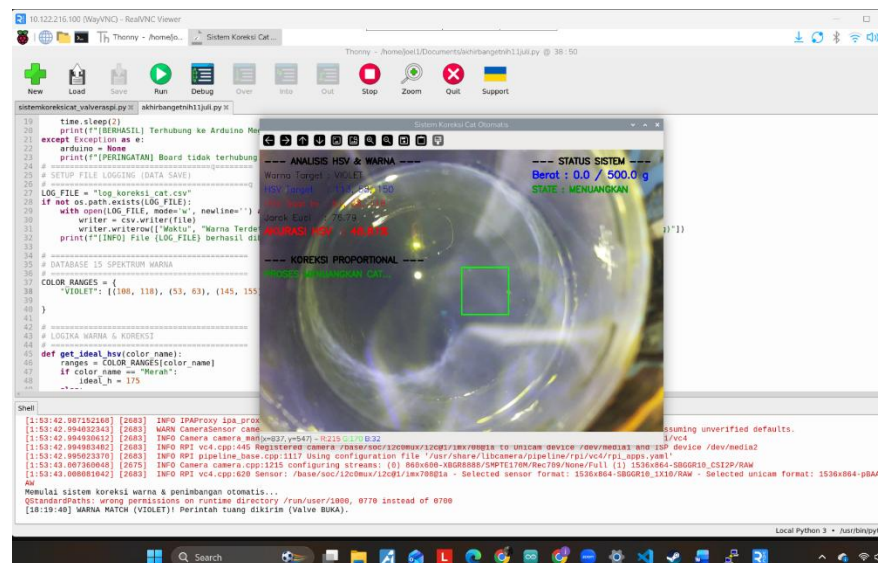
- Warna Target : Oranye**
- Berat : 0.0 / 500.0 g**
- STATUS SISTEM**
- BERAT : 0.00**
- KOREKSI**
- AKURASI HSV : 84.70%**
- KOREKSI PROPORTIONAL**
- g - Putih : 0.00**
- g - Kuning : 0.00**

At the bottom of the screen, a terminal window shows the output of the script, including timestamps, log messages, and a warning about permissions on the `/run/user/1000` directory.

Gambar 4.9 Percobaan Warna Cat orange Dengan Cahaya yang Divariasikan Serta Pemindahan Target ROI



Gambar 4.10 Percobaan Warna Cat Violet Dengan Cahaya yang Divariasikan



Gambar 4.11 Percobaan Warna Cat Violet Dengan Cahaya yang Divariasikan Serta Perpindahan Target ROI

Secara teoritis, penggunaan ruang warna *HSV* telah dipilih karena memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap variasi pencahayaan dibandingkan ruang warna *RGB*, karena *HSV* mengisolasi informasi warna murni (*Hue*) dari tingkat kecerahan (*Value*). Akan tetapi, pantulan cahaya langsung yang terlalu intens tetap menyebabkan nilai kecerahan (*Value*) melonjak mendekati batas maksimal dan nilai saturasi (*Saturation*) menurun drastis. Hal ini menyebabkan elemen *Hue* kehilangan

validitasnya. Akibatnya, meskipun algoritma kompensasi proporsional berjalan dengan benar, input data yang terdistorsi oleh silau cahaya tersebut memicu kalkulasi *error* yang cukup tinggi dan menurunkan akurasi pembacaan sesaat.

Tingginya Tingkat *error* pada pengambilan data awal dipengaruhi oleh posisi kamera serta *targeting ROI* yang belum stasioner secara optimal. Kamera belum diposisikan pada ketetapan akhir yang penulis buat yaitu pada jarak vertikal 22 cm dari dasar tabung berukuran 30 cm, sehingga sudut pandang kamera masih sangat rentan menangkap sudut pantul dari pencahayaan luar. Namun pengambilan data awal dilakukan guna menganalisis jarak optimal dan fiksasi jarak 22 cm dengan sudut kemiringan tertentu ditetapkan sebagai solusi terukur untuk menghindari area pantulan cahaya, sehingga pembacaan *computer vision* menjadi stabil untuk menciptakan sistem koreksi warna yang andal dapat tercapai.

4.5 Pengujian Koreksi Warna Otomatis

Pada bagian subbab ini memamparkan hasil dari pengujian dan analisis terhadap integrasi sistem koreksi warna cat secara utuh (*closed-loop automation*). Pengujian ini dilakukan untuk memvalidasi kelancaran komunikasi dan perpindahan kendali antara perangkat lunak pengolahan citra pada mikrokontroler (Raspberry Pi) dan perangkat keras aktuator (Arduino Mega Pro Mini). Secara prosedur dan alur keberjalanan proses, sistem dirancang untuk menjalankan serangkaian tugas berkesinambungan: mengeksekusi penuangan resep dasar, melakukan inspeksi optis menggunakan visi komputer, mengkalkulasi deviasi warna (HSV), serta menjalankan siklus koreksi berbasis metode *Proportional* apabila deviasi melebihi batas yang telah ditentukan.

Sebagai tahapan akhir penyelesaian siklus (*finishing*), setiap kali algoritma pada Raspberry Pi menyatakan bahwa nilai deviasi telah mencapai konvergensi ($<10\%$), maka sistem akan melepaskan kendali serta menyerahkan informasi WARNA_SESUAI kepada mikrokontroler. Mikrokontroler selanjutnya mengambil alih komunikasi serta peran untuk menampilkan notifikasi keberhasilan pada layer antarmuka (LCD TFT), serta menerapkan delay waktu keamanan (*safety delay*) selama 2 detik untuk memastikan dinamika cairan stabil, dan mengaktifkan katup solenoid serta pompa diafragma keluaran. Proses

drainase cat secara otomatis akan diputus oleh sistem kendali beban ketika sensor *load cell* mendeteksi massa produk akhir dalam wadah telah mencapai presisi 120 gram.

Tabel 4.1 Hasil Koreksi Warna

Warna	Target HSV	Aktual HSV	Error
Pencampuran			
Orange	((10, 28), (8, 18), (151, 161)),	15.5, 45, 166.0	7.06%
Violet	((105, 115), (42, 52), (123, 133))	112, 52.5, 130.0	5.92%
Sky Blue	((95, 112), (70, 100), (135, 160))	107, 73, 135	14.62 %
Hijau	((62, 72), (29, 39), (147, 157))	75.5, 41, 132	17.82%
Hijau Zaitun	((33, 43), (25, 36), (127, 147))	32.5, 34, 132	7.90%

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel di atas, tiga dari lima warna, yaitu Orange, Violet, dan Hijau Zaitun, berhasil mencapai konvergensi di bawah ambang batas toleransi sebesar 10% pada iterasi pertama, sedangkan dua warna lainnya, yaitu Sky Blue dan Hijau, masih menunjukkan galat berturut-turut sebesar 14,62% dan 17,82%. Fenomena tersebut dapat dijelaskan melalui beberapa faktor yang saling berkaitan.

Ditinjau Kembali dari teori kendali, sistem ini menerapkan kontrol proporsional murni melalui persamaan 2.5 tanpa disertai komponen integral. Secara teoretis, kontrol proporsional murni memang mampu mengurangi galat secara signifikan dalam satu Langkah koreksi, yang meruapakn *steady-state error* pada sistem kendali proporsional. Penelitian yang dilakukan oleh H.liang,dalam jurnal yang berjudul “*Pigmen identification with optical coherence tomography and*

multispectral imaging” menyebutkan bahwa kebutuhan akan lebih dari satu iterasi pada sebgaiian warna bukan merupakan indikasi kegagalan sistem, melainkan kosenskuensi matematis yang wajar dari pemilihan skema kontrol proporsional dan sejalan dengan tujuan perancangan sistem yang dirancang bersifat iratif guna mencapai konvergensi.

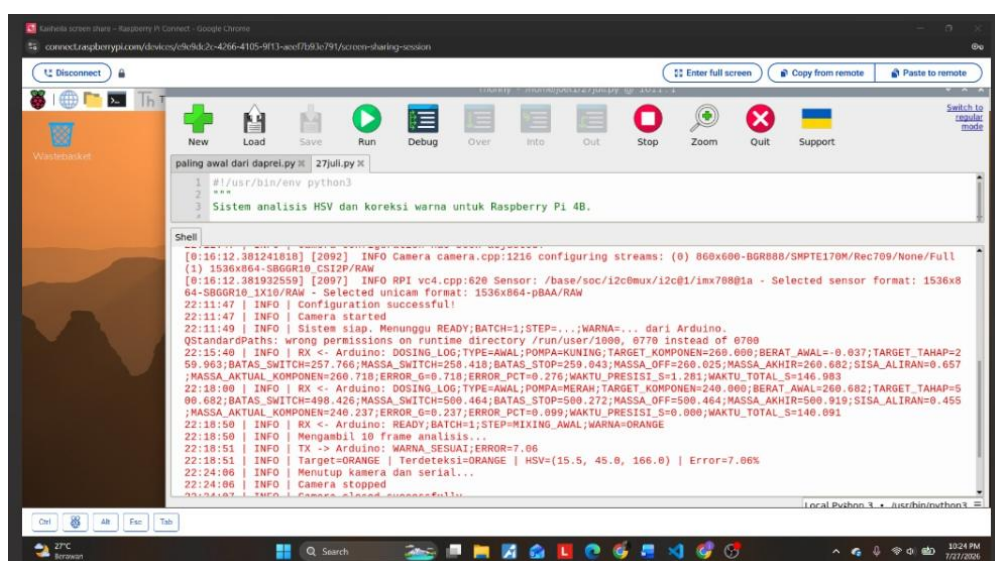
Lalu ditinjau dari aspek fisika pencampuran wrna, persamaan dosing yang digunakan mengasumsikan adanya hbungan linear antara massa pigmen yang dituangkan dan hasil perubahan warna dari pencampuran. Pada hasil yang ditampilkan, pencampuran pigmen, yang berbeda karakteristiknya dari cpencampuran cahaya pada model RGB, bersifat non-lienar yang merujuk pada Teori *Kubelka-Munk* yang membuktikan bahwa campuran pigmen menyerap dan memantulkan cahaya secara non-linear terhadap konsentrasinya. Semakin banyak jenis pigmen dasar yang dikombinasikan untuk mencapai nilai suatu target, maka semakin besar pula potensi penyimpangan dari asumsi linear tersebut. Kecenderungan ini juga tampak pada data pengujian, yaitu nilai *value* actual pada warna hijau (132) yang berada di bawah keseluruhan rentang target (147-157), yang menunjukkan hasil campuran lebih gelap dari yang diharapkan. Kondisi tersebut sejalan dengan model Kubelka-Munk secara teoritis lebih rentan menghasilkan penyimpangan pada pemilihan pigmen campuran warna gelap. Hal tersebut juga sama dengan warna *Sky Blue*, nilai *Saturation* aktuannya berada pada angka 73, berada cukup jauh dibawah titik Tengah target yaitu 85, yang mengindikasikan hasil campuran kurang jenuh dibandingkan dengan target yang ditetapkan.

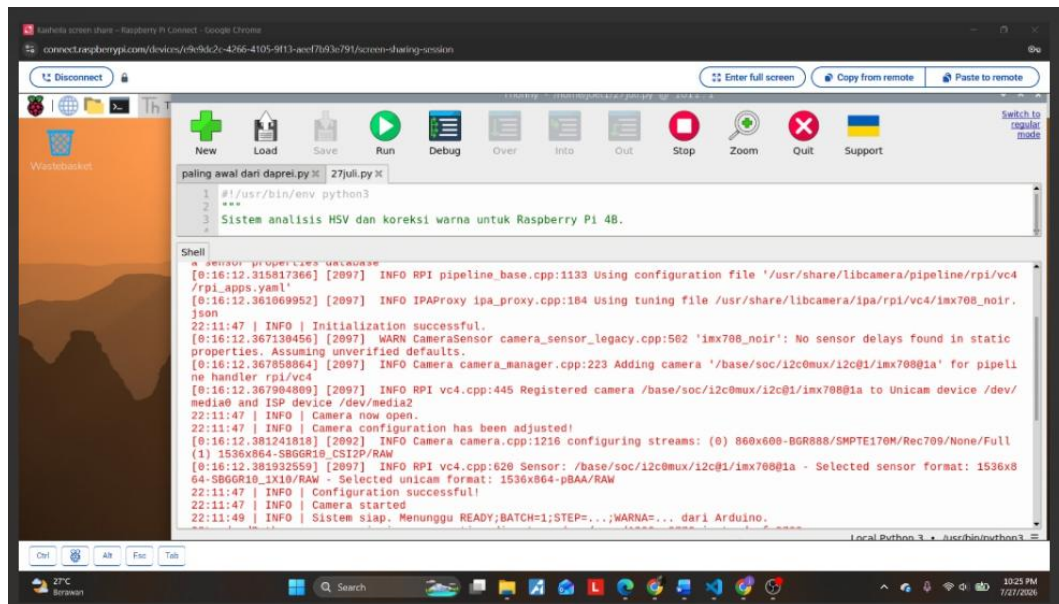
Ketiga, galat yang terukur turut dipengaruhi oleh faktor di luar proses pencampuran, yaitu pada tahap akuisisi citra itu sendiri. Variasi intensitas pencahayaan LED, pantulan spekular pada permukaan cat cair, serta karakteristik sensor kamera merupakan sumber derau (*noise*) yang telah didokumentasikan dalam penelitian ini sebagai faktor yang memengaruhi akurasi pengukuran warna berbasis kamera di luar akurasi proses pencampuran itu sendiri. Persentasi galat yang dikalkulasi pada sistem ini tidak hanya mengambil selisih nilai secara mentah, melainkan juga didasarkan pada perhitungan matematis kestabilan yang ditinjau kembali dari teori standar deviasi. Sebaran data pembacaan dievaluasi secara

terpisah untuk masing-masing kanal H, S, dan V dari sejumlah total pengambilan *frame* (N). Dengan memasukkan parameter standar deviasi ini, sistem mampu memastikan bahwa nilai HSV aktual yang digunakan untuk mengeksekusi perhitungan galat akhir adalah nilai rata-rata (*mean*) dari populasi data citra yang telah teruji kestabilannya, sehingga meminimalisir munculnya *error* palsu akibat fluktuasi sesaat dari pantulan cahaya maupun riak fluida.

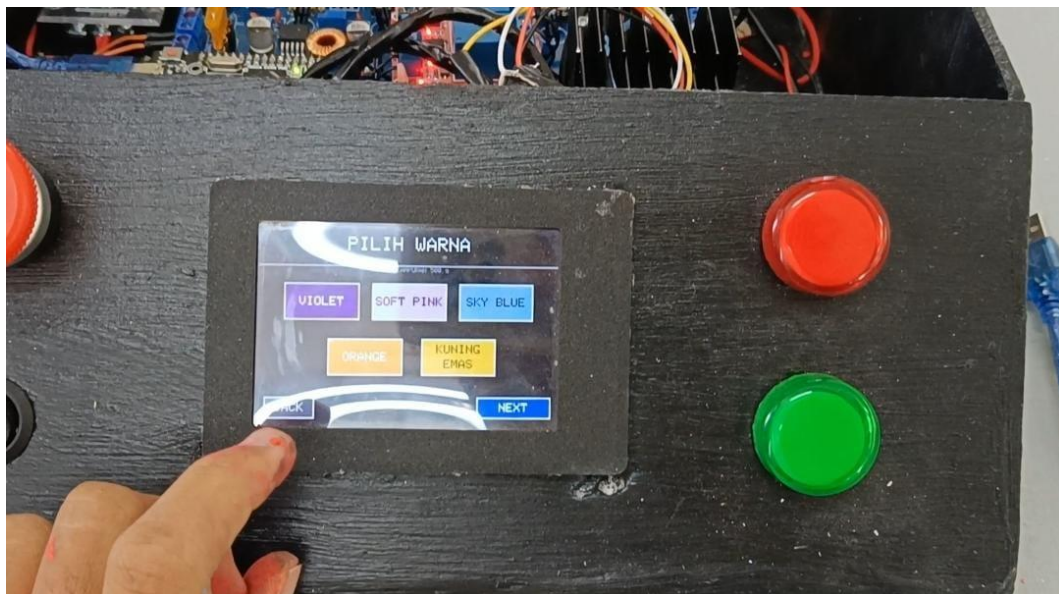
4.5.1 Pengujian Evaluasi Basis dan Konvergensi Nol-Iterasi Pada Target Orange

Pengujian pertama direalisasikan pada target warna orange, yang menjadi parameter basis (baseline) untuk memvalidasi alur kerja standar setiap warna yang digunakan. Pengujian ini sebagai tolak ukur karena memadukan dua warna primer dengan volume yang seimbang. Proses otomasi diinisiasi oleh mikrokontroler yang menggerakkan pompa peristaltic untuk menuang resep dasar, terdiri dari 260 gram pigmen kuning dan 240 gram pigmen merah. Selama proses penuangan dan pengadukan oleh motor mixer berlangsung, modul visi komputer pada Raspberry Pi secara aktif menampilkan ntarmuka Live Preview sembari menahan status komputasi pada mode "MENUNGGU READY". Mekanisme penahanan ini membuktikan bahwa filter komunikasi serial bekerja sempurna mencegah eksekusi inspeksi yang prematur sebelum cairan benar-benar homogen.





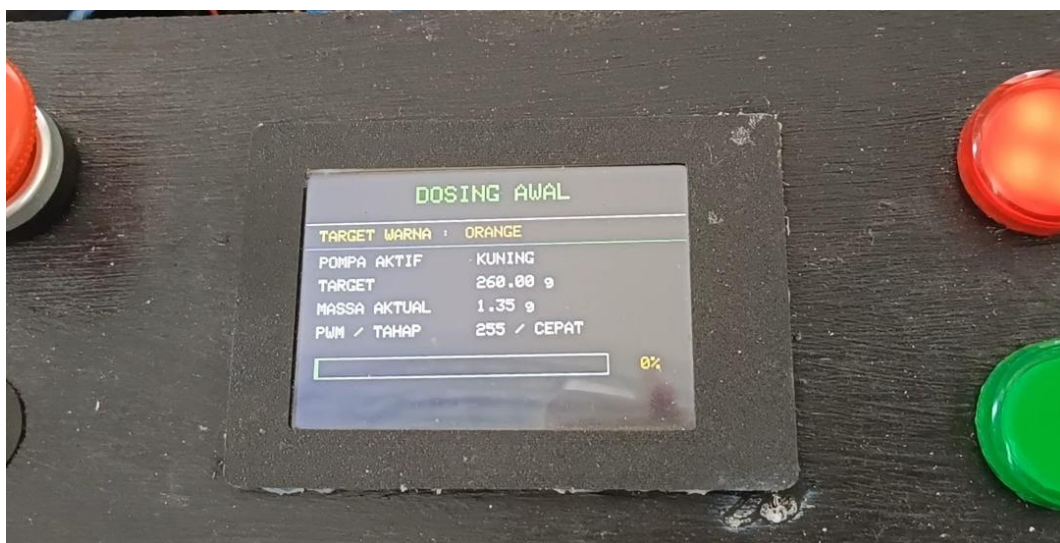
Gambar 4.13 Inisialisasi Sistem Ready



Gambar 4.14 Tampilan HMI Pemilihan Warna Target Orange



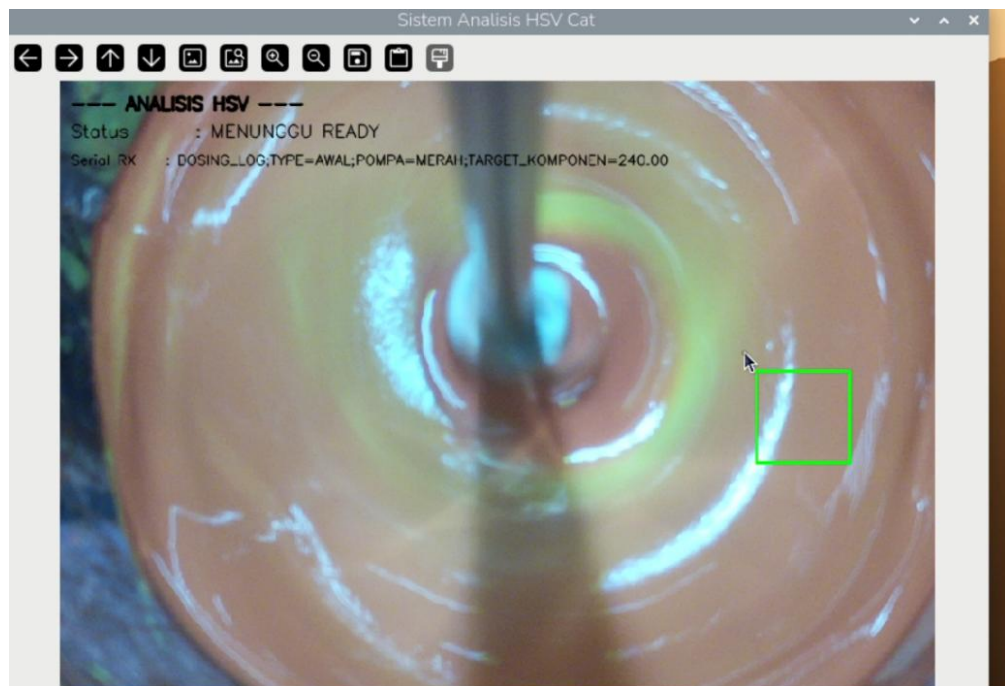
Gambar 4.15 Tampilan Komposisi Campuran Warna yang digunakan



Gambar 4.16 Proses Dosing Warna Kuning Sebanyak 260 Gram



Gambar 4.17 Dosing Warna Merah Sebanyak 240 Gram



Gambar 4.18 Pencampuran Cat Kuning 260 Gram dan Cat Merah 240 Gram

Setelah mikrokontroler mengonfirmasi penyelesaian fase pengadukan melalui transmisi data serial, kamera segera mengekstraksi area *Region of Interest* (ROI). Hasil ekstraksi dari 10 bingkai (*frames*) citra presisi menunjukkan bahwa

permukaan cairan memiliki metrik HSV aktual di angka (15.5, 45.0, 166.0). Sistem kemudian menjalankan komputasi jarak *Euclidean* untuk membandingkan metrik tersebut terhadap matriks HSV target "Orange" di pangkalan data yang bernilai (19.0, 13.0, 156.0). Perhitungan matematis ini menghasilkan nilai deviasi () absolut sebesar 7.06%.

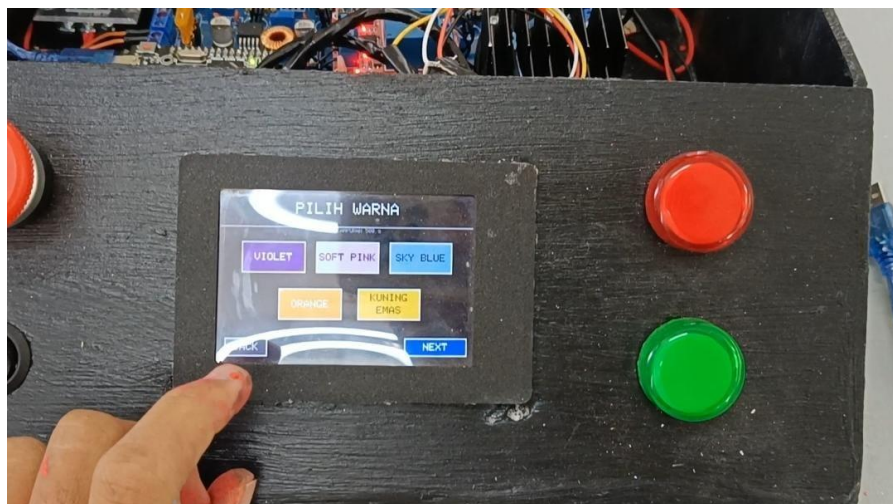


Gambar 4.19 Hasil Proses Mixing Berhasil Tanpa Iterasi

Oleh karena tingkat penyimpangan optis tersebut langsung memenuhi ambang batas toleransi sistem ($\leq 10\%$) sejak tahap pertama, algoritma kendali seketika mengambil keputusan konvergensi tanpa memerlukan siklus iterasi koreksi lanjutan (*zero-iteration*). Raspberry Pi mengunci perhitungan koreksi gramasi di angka nol dan mentransmisikan paket data *interlock* WARNA_SESUAI kepada Arduino. Merespons instruksi final tersebut, mikrokontroler mengeksekusi penundaan waktu (*delay*) pengamanan selama 2 detik untuk meredam gelombang sisa pengadukan pada fluida. Setelah jeda terpenuhi, aktuator pompa diafragma dan *solenoid valve* diaktifkan untuk menguras cairan ke wadah hasil, dan terputus secara otomatis dengan tingkat kepresisian tinggi saat *load cell* mendeteksi massa keluaran mencapai batas 120 gram.

4.5.2 Evaluasi Akurasi Iterasi Tunggal pada Target *Sky Blue*

Pengujian kedua difokuskan pada target "*Sky Blue*" untuk mengamati tingkat responsivitas algoritma dalam mendeteksi dan mengoreksi warna yang memiliki tingkat kecerahan (*Value*) ekstrem. Komposisi awal dirumuskan dengan tingkat disparitas volume yang sangat tinggi, yakni 495 gram pigmen Biru berbanding 5 gram pigmen Putih. Setelah pengadukan awal selesai, inspeksi optis tahap pertama dilakukan. Kamera menangkap metrik HSV aktual pada (107.0, 73.0, 135.0). Apabila dikomparasikan dengan target sistem (103.5, 85.0, 147.5), deviasi yang dihasilkan tergolong cukup tinggi, yaitu 14.62%.



Gambar 4.20 Tampilan Pemilihan Warna *Sky Blue*



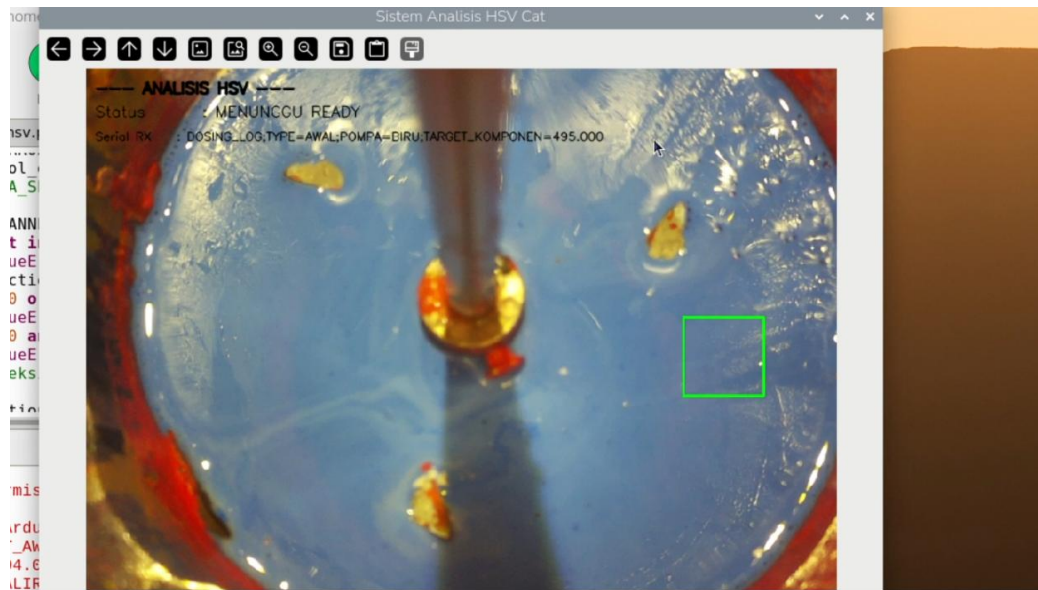
Gambar 4.21 Tampilan Komposisi Cat Untuk Warna *Sky Blue*



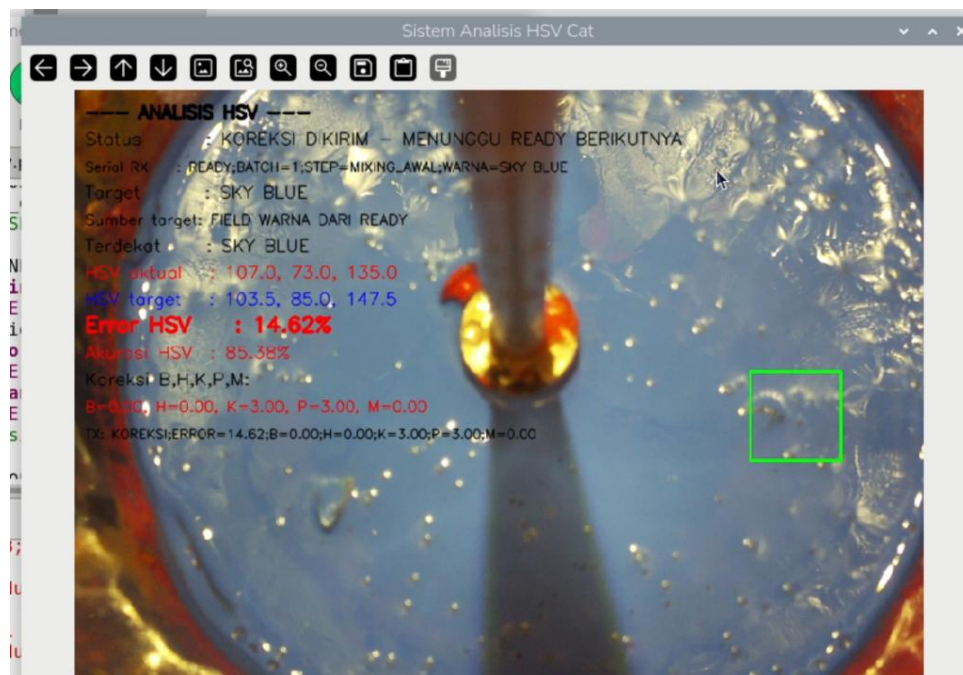
Gambar 4.22 Tampilan Dosing Awal Warna Biru Dengan Target Warna *Sky Blue* Sebanyak 495 Gram



Gambar 4.23 Tampilan Dosing Awal Warna Putih Dengan Target *Sky Blue* Sebanyak 5 Gram



Gambar 4.24 Inisialisasi Awal Pencampuran Warna Biru 495 Gram dan Putih 5 Gram



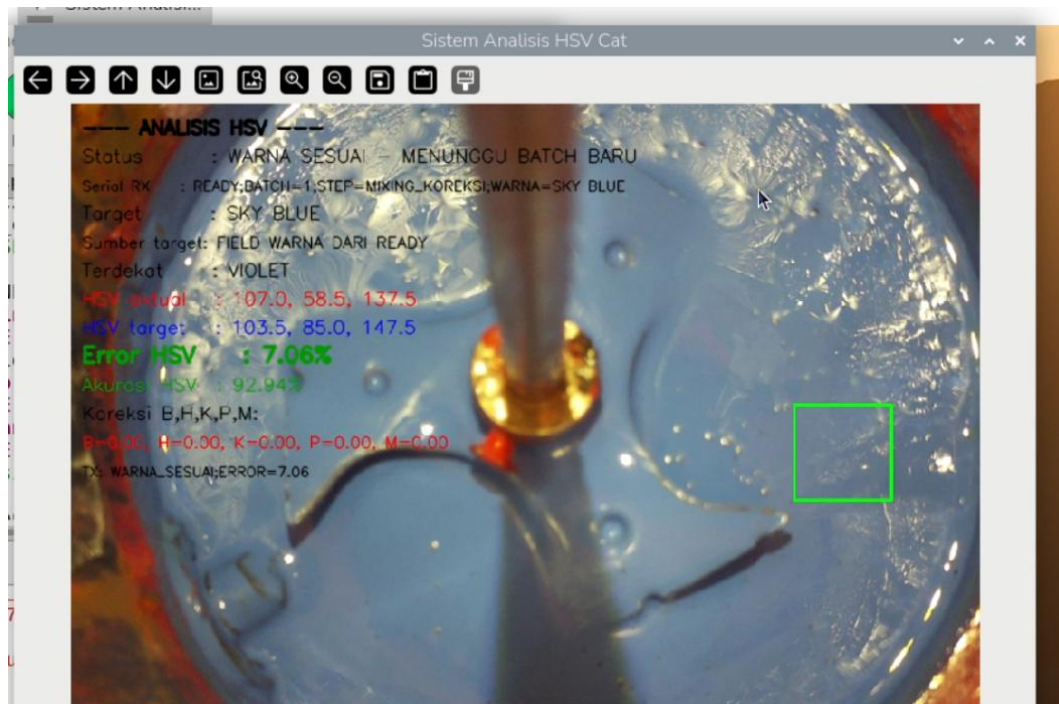
Gambar 4.25 Hasil Pencampuran Warna, Terindikasi Error 14.62%

Karena nilai ini secara logis ditolak oleh ambang batas toleransi algoritma, perangkat lunak secara otomatis merumuskan perhitungan *Proportional*. Sistem menugaskan penambahan dosis koreksi spesifik sebesar 3 gram pigmen Kuning dan 3 gram pigmen Putih untuk menyeimbangkan kembali rona (*Hue*) dan kejenuhan

(*Saturation*) campuran. Instruksi numerik ini kemudian ditransmisikan kembali kepada Arduino untuk dieksekusi secara mekanis oleh pompa peristaltik. Keputusan sistem untuk mengeksekusi koreksi kombinasi 3 gram pigmen Kuning dan 3 gram pigmen Putih memperlihatkan kemampuan adaptasi multi-parameter dalam ruang warna HSV. Algoritma tidak hanya berfokus pada perbaikan satu sumbu warna saja, melainkan mampu menyeimbangkan rona dan kejenuhan secara bersamaan guna mempercepat konvergensi warna menuju *threshold* yang diizinkan. Hal ini mencegah terjadinya siklus koreksi berulang yang terlalu banyak akibat penambahan pigmen yang tidak seimbang.

Dari sisi aktuasi, keterlibatan pompa peristaltik yang dikendalikan oleh Arduino memastikan akurasi penakaran fluida dalam skala gramatur kecil. Respon cepat dari bagian mekanis dalam menerjemahkan sinyal perintah perangkat lunak menunjukkan bahwa dinamika kompensasi warna dapat berlangsung secara *real-time*. Efisiensi eksekusi pada fase ini menjadi penentu penting agar iterasi pencampuran warna selanjutnya dapat mencapai tingkat presisi yang diharapkan tanpa menimbulkan *overshoot* material.

Keselarasan antara presisi aktuasi mekanis dan ketepatan kalkulasi algoritma ini menjadi bukti efektivitas kendali loop tertutup (*closed-loop control*) yang diterapkan. Dengan meminimalkan intervensi manual serta risiko kelebihan dosis, sistem mampu mempertahankan stabilitas proses pencampuran secara konsisten. Hal ini menegaskan bahwa pendekatan kompensasi multi-parameter tidak hanya mempercepat waktu koreksi, tetapi juga menjamin keandalan sistem dalam mencapai ekuilibrium warna secara terukur pada setiap iterasi.



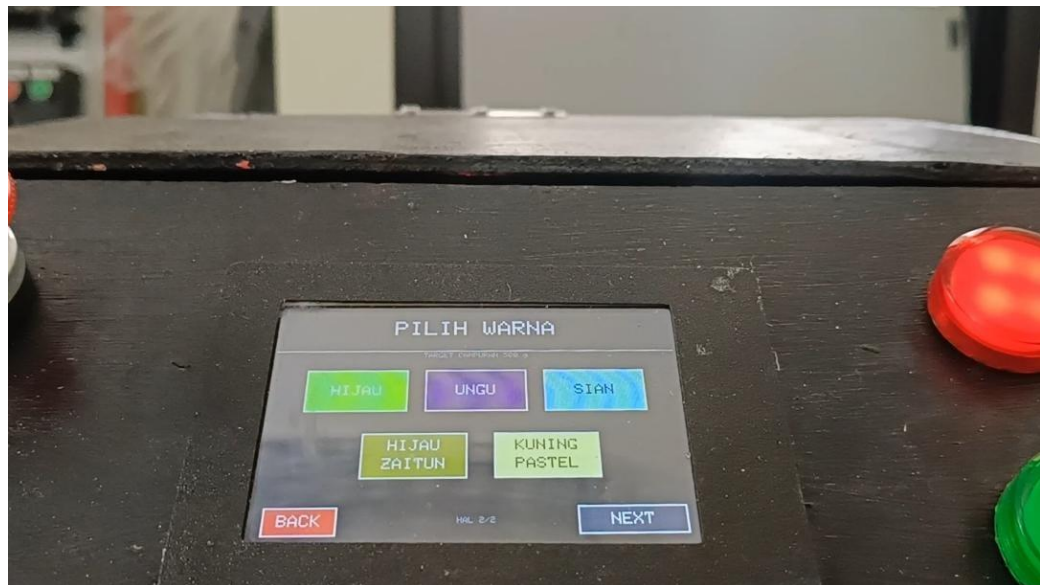
Gambar 4.26 Hasil Koreksi Warna, Penambahan Warna Putih Sebanyak 3 Gram, dan Kuning 3 Gram

Setelah komponen koreksi dicampurkan dan motor pengaduk kembali melakukan homogenisasi, sistem memasuki fase evaluasi iterasi kedua. Ekstraksi ROI lanjutan menunjukkan adanya pergeseran metrik HSV aktual yang sangat signifikan ke angka (107.0, 58.5, 137.5). Perubahan metrik ini berdampak langsung pada penurunan drastis persentase menjadi 7.06%. Dengan tercapainya standar akurasi (92.94%), komputasi visi komputer mengakhiri iterasi dan menyerahkan status keberhasilan kepada mikrokontroler. Sesuai dengan protokol akhir otomasi, Arduino Mega Pro Mini menerima instruksi tersebut, menginisiasi jeda stabilisasi fluida selama 2 detik, lalu membuka katup keluaran hingga sensor massa memutus aliran tepat pada volume 120 gram.

4.5.3 Evaluasi Dinamika Adaptif Multi-Iterasi Pada Target Hijau

Pengujian pencampuran warna sekunder "Hijau", yang dibentuk dari rasio seimbang 250 gram Kuning dan 250 gram Biru, menghadirkan tantangan komputasi paling dinamis. Pengujian ini dirancang untuk melihat ketahanan (*robustness*)

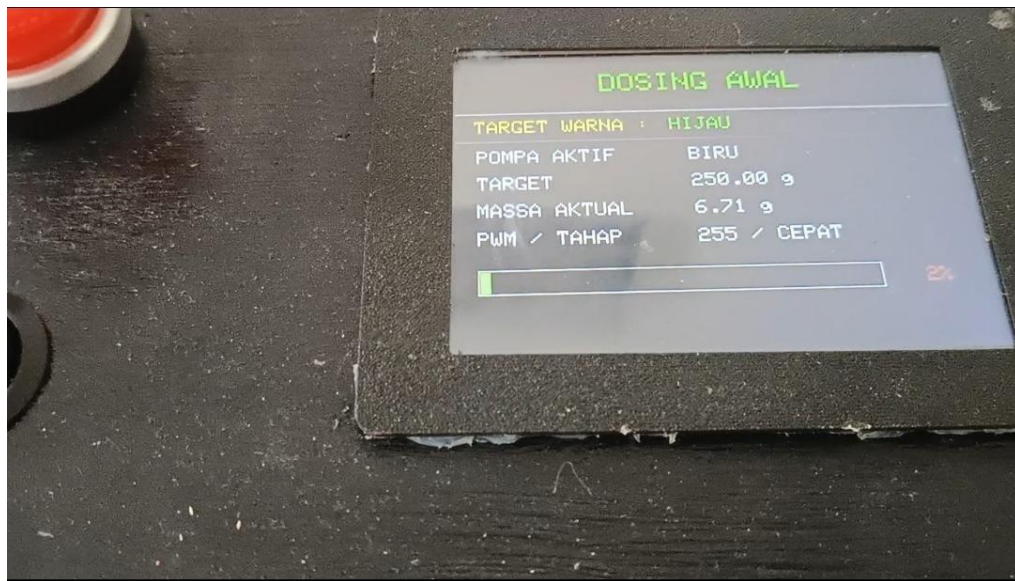
sistem dalam menghadapi dinamika fisik fluida yang membutuhkan siklus komputasi berulang (multi-iterasi).



Gambar 4.27 Tampilan HMI Pemilihan Warna Hijau



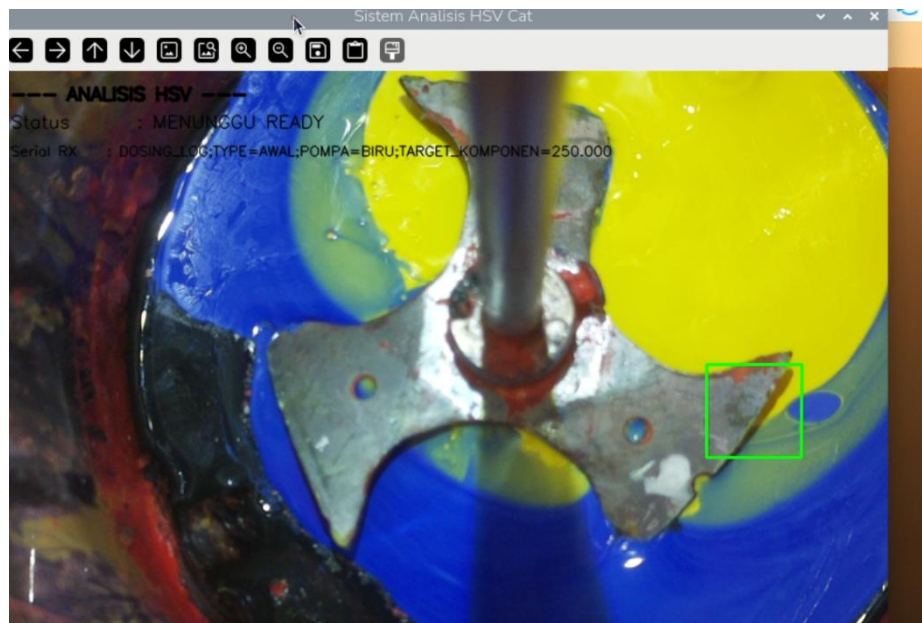
Gambar 4.28 Tampilan Komposisi Pencampuran Warna Hijau



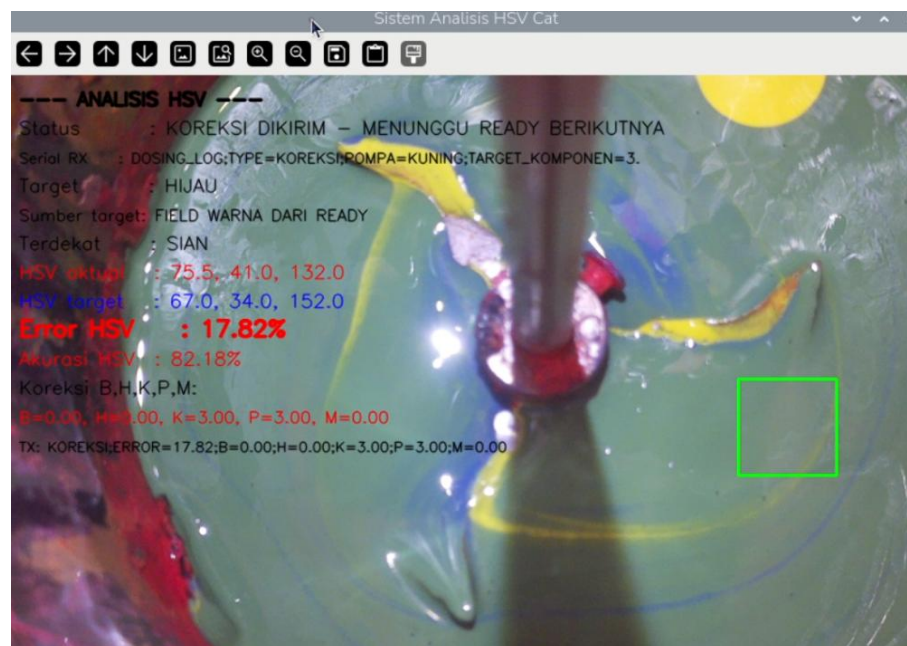
Gambar 4.29 Dosing Awal Warna Biru Sebanyak 250 Gram Untuk Target Warna Hijau



Gambar 4.30 Dosing Awal Warna Kuning Sebanyak 250 Gram Untuk Target Warna Hijau



Gambar 4.31 Inisialisasi Awal Pencampuran Warna Kuning 250 Gram dan Biru 250 Gram

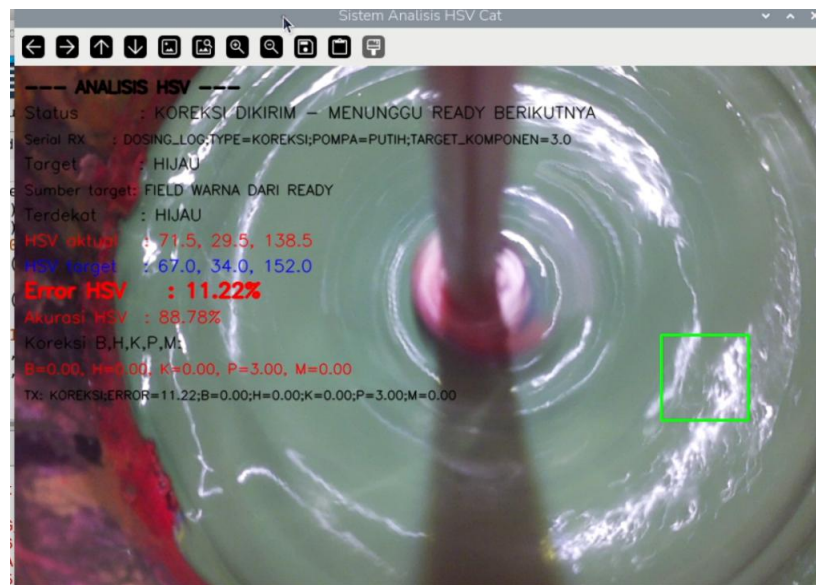


Gambar 4.32 Hasil Pencampuran dengan error 17.82%, dan Penambahan Warna Kuning Sebanyak 3 Gram dan Putih Sebanyak 3 Gram

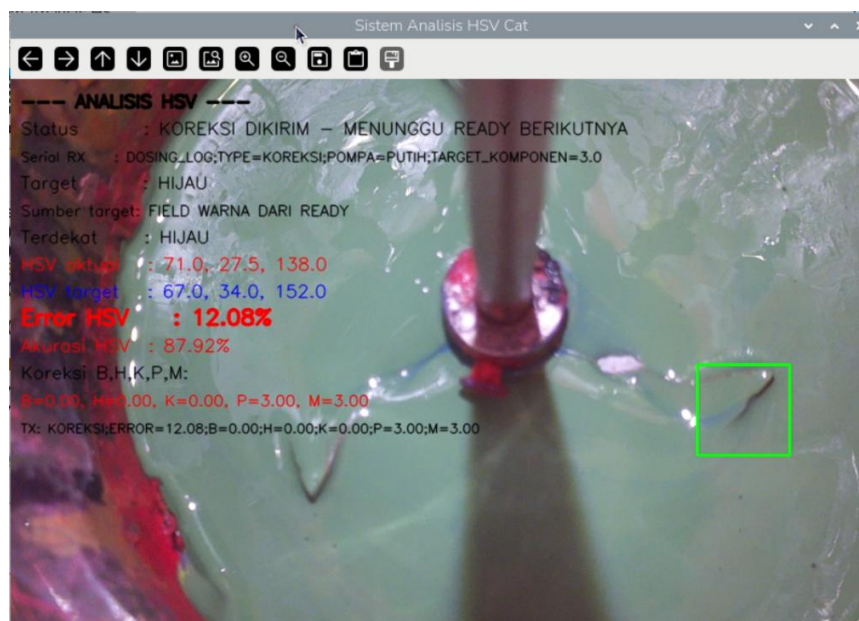
Pada fase inspeksi pasca-penuangan dasar, sistem mendeteksi deviasi yang masif sebesar 17.82%,. Algoritma merespons secara akurat dengan

menginstruksikan penambahan 3 gram Kuning dan 3 gram Putih. Namun, pada siklus inspeksi lanjutan (iterasi kedua), nilai yang turun ke 11.22% masih belum memenuhi syarat pengkoreksian sistem, sehingga memicu instruksi koreksi tambahan berupa 3 gram Putih. Penurunan deviasi dari 17.82% menjadi 11.22% pada iterasi kedua menunjukkan bahwa penambahan kompensasi awal pigmen Kuning dan Putih telah berhasil menggeser koordinat warna ke arah target secara signifikan. Namun, karena deviasi 11.22% masih berada di atas ambang batas toleransi (*threshold*) yang ditetapkan oleh sistem, algoritma secara logis menilai bahwa tingkat kecerahan (*Value*) dan saturasi warna belum mencapai kondisi optimal. Instruksi penambahan 3 gram pigmen Putih pada siklus lanjutan ini bertujuan untuk mendongkrak komponen kecerahan tanpa merusak dominasi *Hue* yang telah terbentuk.

Dosis bertahap yang dieksekusi oleh algoritma terbukti efektif dalam mencegah terjadinya *overshoot* atau kelebihan takaran pigmen yang dapat memperburuk deviasi warna. Pendekatan kalkulasi inkremental ini memastikan bahwa setiap iterasi membawa nilai HSV semakin mendekati titik ekuilibrium secara terukur. Hal ini menegaskan keandalan logika kendali sistem dalam mengelola transisi warna secara halus pada tahap-tahap awal proses koreksi. Selain itu, pendekatan bertahap ini juga mampu meminimalkan potensi pemborosan bahan baku pigmen, sehingga proses koreksi warna dapat berjalan lebih efisien baik secara teknis dan operasional.



Gambar 4.33 Hasil Penambahan Koreksi Pertama dan Error Menjadi 11.22%

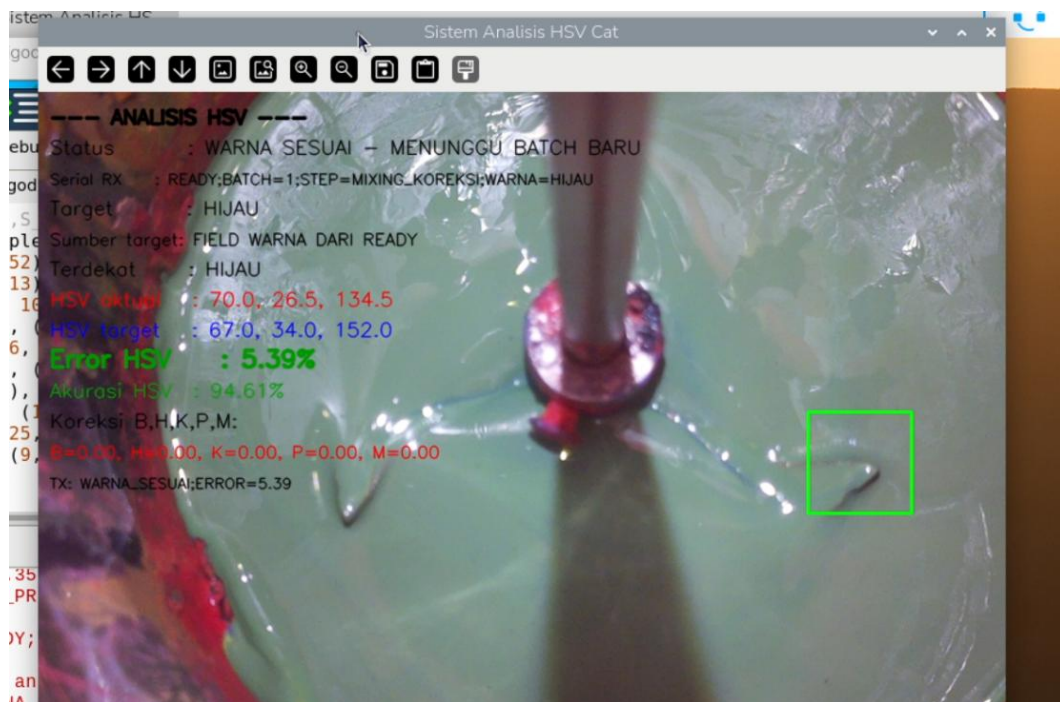


Gambar 4.34 Hasil Pengkoreksian Kedua Mengalami Kenaikan Sebesar 12.08%

Dinamika sistem otomatis nyata terlihat jelas pada fase iterasi ketiga, di mana pembacaan optis mengalami fluktuasi deviasi minor—naik dari 11.22% menjadi 12.08% (dengan HSV aktual 71.0, 27.5, 138.0). Fluktuasi ini lazim dijumpai pada fluida berviskositas tinggi akibat pola homogenisasi yang kompleks. Dalam kondisi ini, algoritma kendali terbukti tidak mengalami kegagalan proses

(*system hang*). Perangkat lunak secara dinamis beradaptasi, melakukan kalkulasi ulang berdasarkan metrik terbaru, dan mengeksekusi kompensasi berupa penambahan 3 gram pigmen Putih dan 3 gram pigmen Merah untuk menarik parameter saturasi dan kecerahan ke arah *ekuilibrium* (kesetimbangan). Penambahan pigmen Putih (*White*) dan Merah (*Red*) pada iterasi ini secara langsung merefleksikan prinsip penyesuaian ruang warna HSV, di mana pigmen Putih berfungsi meningkatkan nilai *Value* (kecerahan) sekaligus menetralkan tingkat *Saturation*, sementara pigmen Merah menggeser koordinat *Hue* ke rentang target yang diinginkan. Hasilnya, pada iterasi berikutnya, tren deviasi berhasil ditekan kembali ke bawah ambang batas toleransi. Hal ini mengonfirmasi bahwa perhitungan variabel gramatur pigmen berbasis diferensial nilai HSV oleh sistem bekerja secara presisi dalam merespons perubahan kondisi fisik cat.

Keberhasilan fase ini menandai stabilnya lintasan konvergensi warna menuju *ekuilibrium* yang ditargetkan. Dengan teratasinya fluktuasi akibat viskositas fluida tanpa memicu *overshoot* atau penambahan pigmen yang berlebihan, sistem membuktikan efisiensi algoritma dalam meminimalkan pemborosan material. Secara keseluruhan, mekanika kendali yang teruji pada iterasi ketiga ini menegaskan keandalan sistem otomasi untuk diaplikasikan pada skenario koreksi warna skala industri yang dinamis.

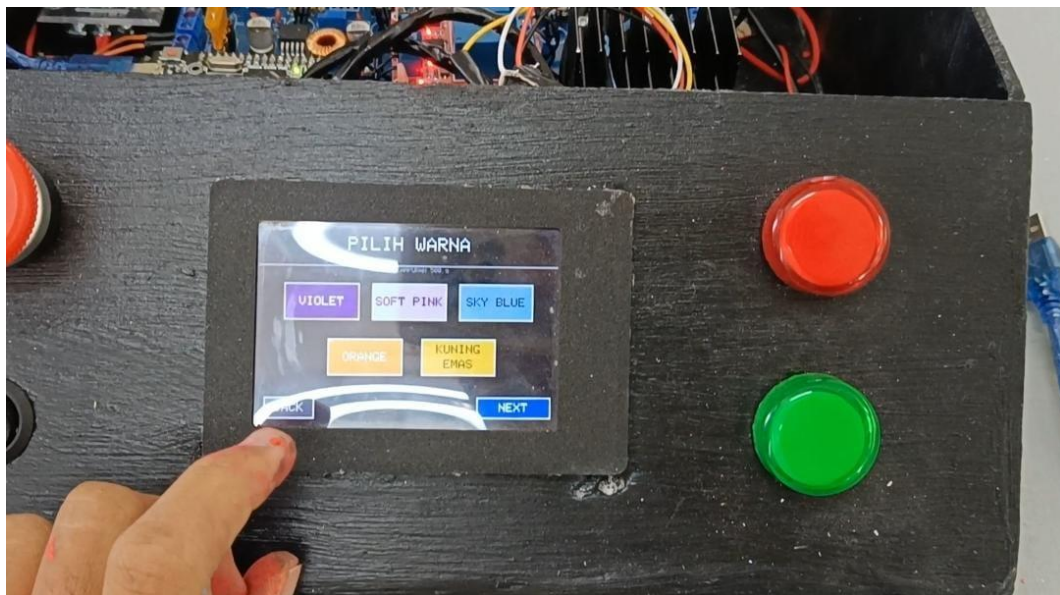


Gambar 4.35 Iterasi Ke 4 Dengan Akurasi Sebesar 94,61%

Keputusan komputasi adaptif tersebut terbukti sangat presisi. Pada eksekusi iterasi keempat (final), pembacaan HSV aktual bergeser stabil ke angka (70.0, 26.5, 134.5), yang secara efektif *mereduksi* penyimpangan optis hingga menyentuh nilai terendah 5.39%. Karena akurasi warna telah melonjak hingga 94.61%, iterasi dihentikan. Informasi WARNA_SESUAI dikirim menuju mikrokontroler untuk dieksekusi menjadi notifikasi LCD, dilanjutkan dengan penerapan jeda keselamatan 2 detik, dan diakhiri dengan proses drainase cat yang terukur sempurna oleh *load cell* pada massa akhir 120 gram.

4.5.4 Evaluasi Dinamika Adaptif Multi-Iterasi Pada Target Violet

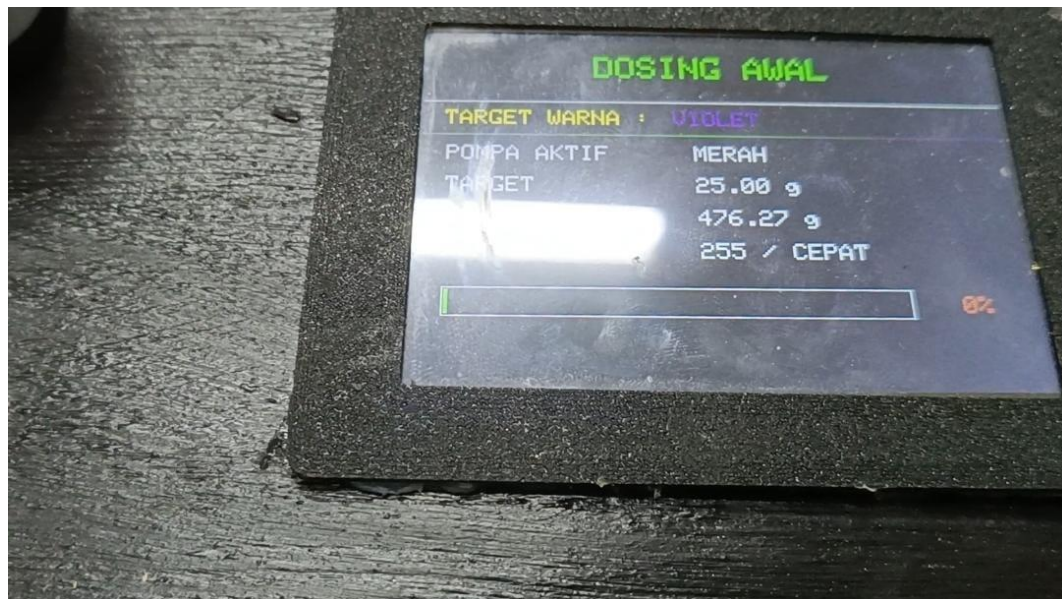
Evaluasi dinamika adaptif multi-iterasi pada proses pencampuran warna cat target *Violeti* menunjukkan bahwa sistem kendali yang dirancang mampu melakukan penyesuaian otomatis untuk mencapai Tingkat akurasi yang ditetapkan. Berdasarkan data pembacaan sensor *Hue*, *Saturation*, *Value*, proses pencampuran 500 gram violet ini terdiri atas 75% pigmen biru dan 25% pigmen merah serta memerlukan tiga tahapan iterasi.



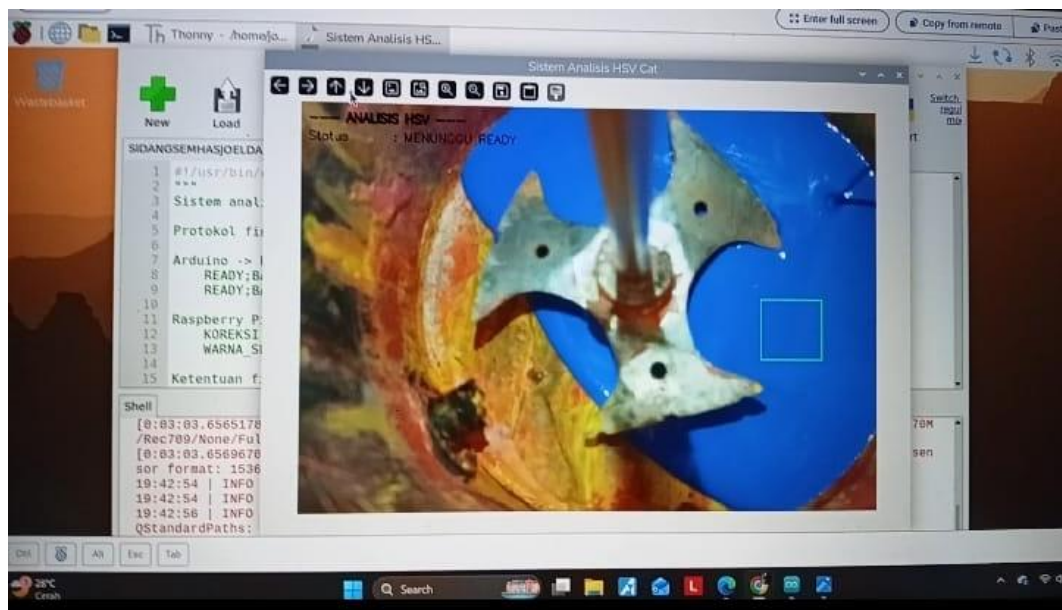
Gambar 4.36 Tampilan HMI Pemilihan Warna Violet



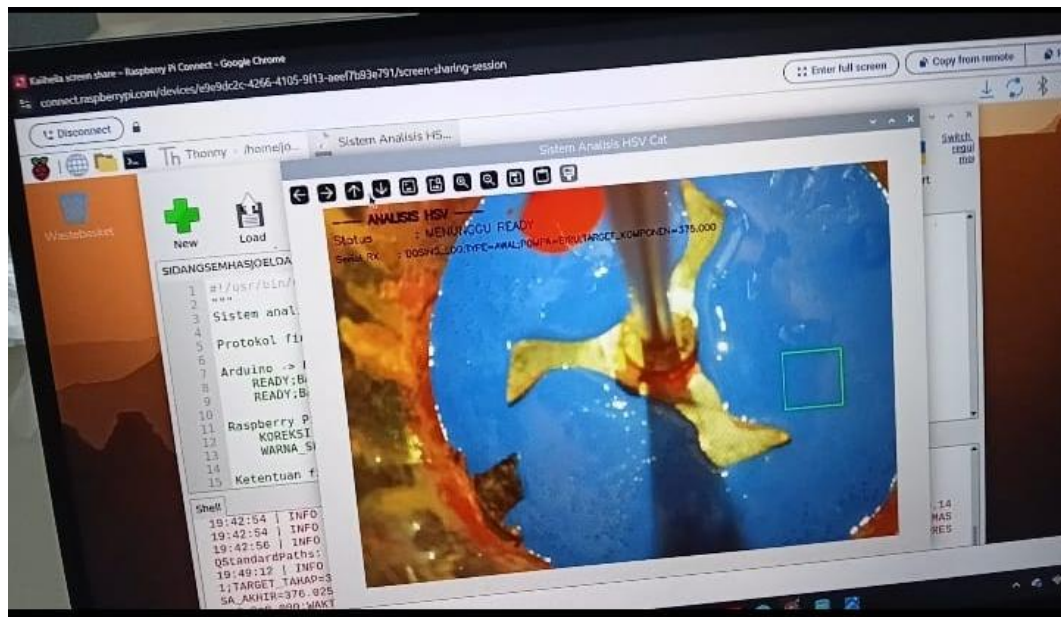
Gambar 4.37 Tampilan Dosing Awal Warna Biru Untuk Target Warna Violet
Sebanyak 475 Gram



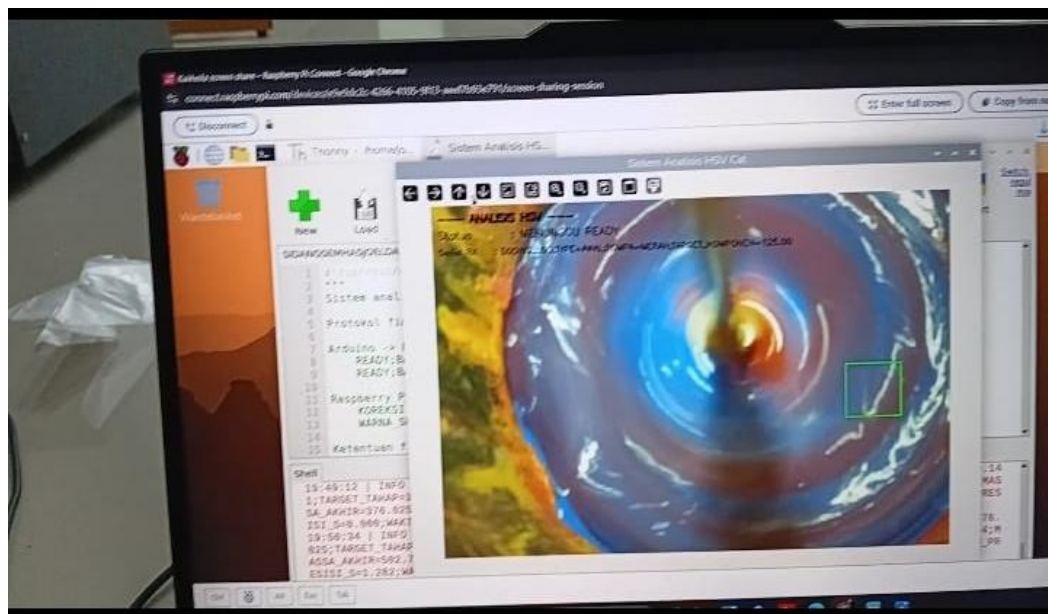
Gambar 4.38 Dosing Awal Warna Merah Untuk Target Warna Violet Sebanyak 25 Gram



Gambar 4.39 Dosing Awal Warna Biru Untuk Target Warna Violet



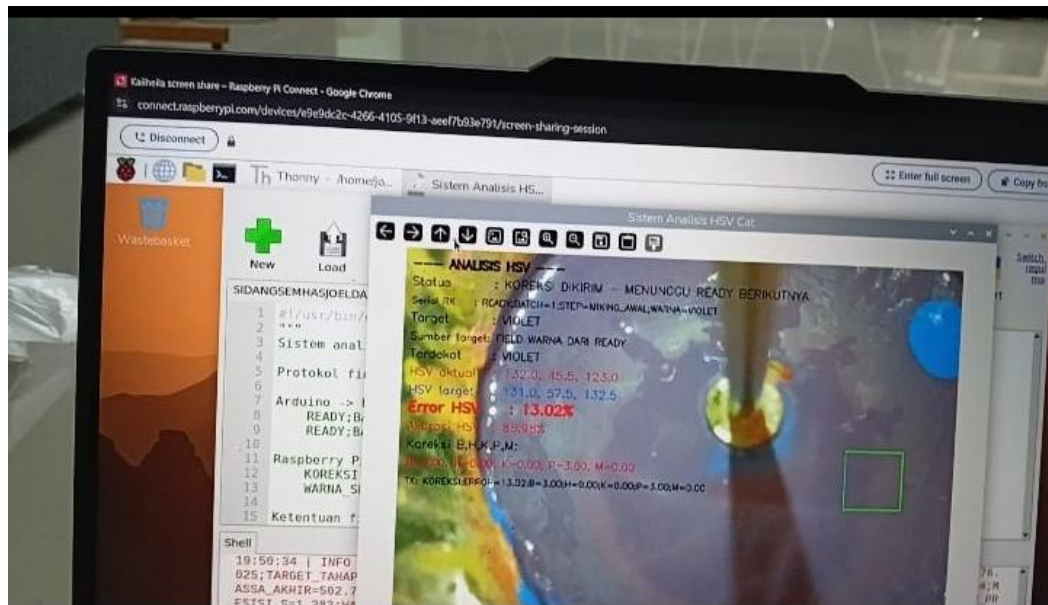
Gambar 4.40 Dosing Warna Merah Untuk Target Warna Violet



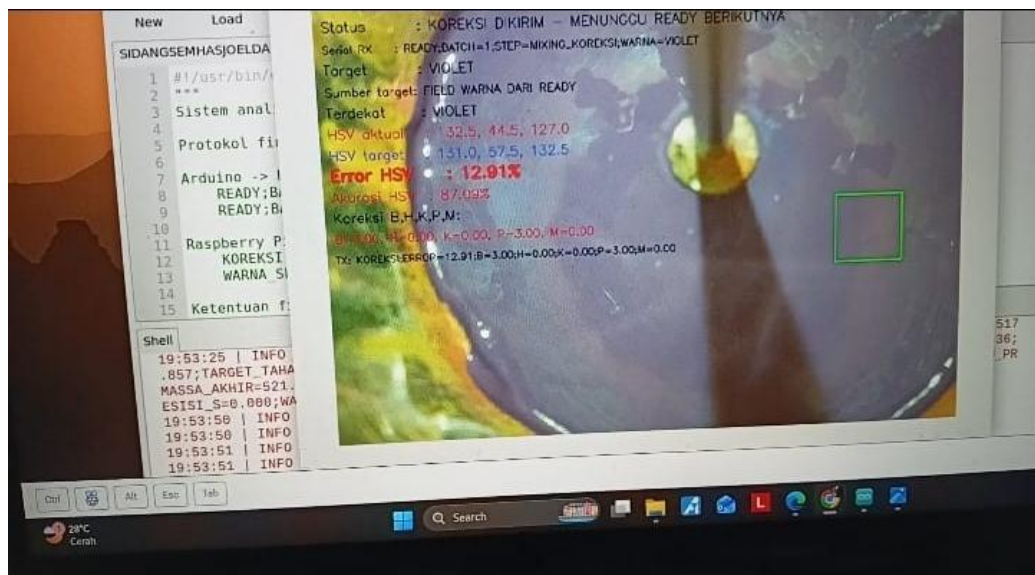
Gambar 4.41 Proses *Mixing*

Tahapan iterasi yang mencapai 3 tahapan terjadi karena kombinasi dominan dari dua pigmen pekat antar abiru dan merah secara alamiah menghasilkan campuran awal yang terlalu gelap atau memiliki nilai intensitas *value* yang rendah bagi tangkapan visual kamera. Sebagai respon terhadap kondisi tersebut, sistem

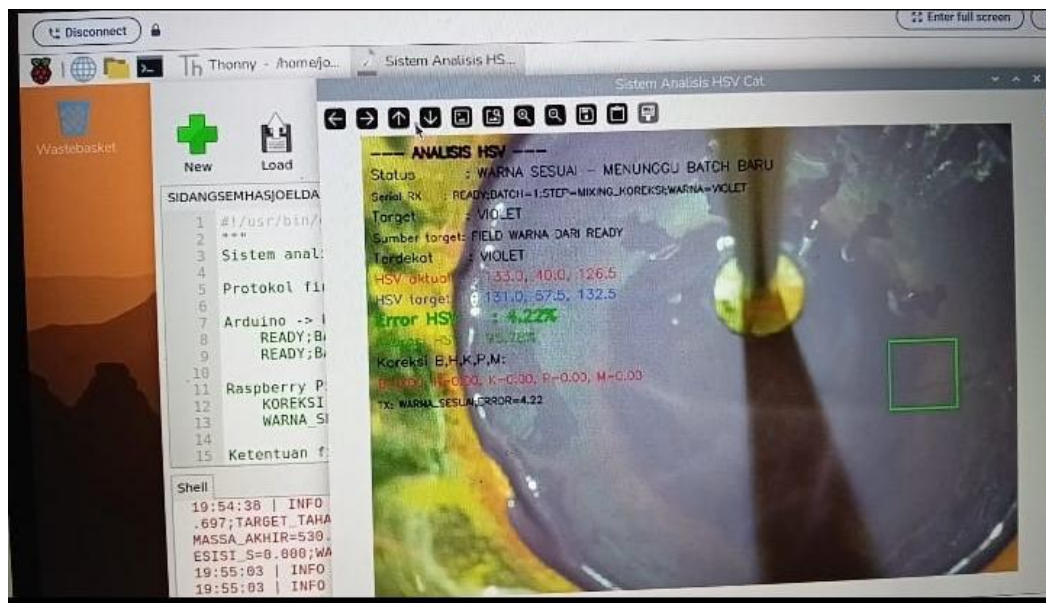
beekerja secara dinamis dengan melakukan koreksi bertahap untuk mencerahkan fluida tanpa merusak komposisi dasar warna target.



Gambar 4.42 Error 13.02% Pada Iterasi Pertama



Gambar 4.43 Error 12.91% Pada Iterasi Kedua



Gambar 4.44 Warna Sesuai Dengan Error 4.22%

Pada iterasi pertama setelah proses pengisian awal, algoritma mendeteksi nilai HSV aktual sebesar (132.0, 45.5, 123.0) terhadap nilai target (131.0, 57.5, 132.5). Meskipun nilai *Hue* telah menunjukkan Tingkat presisi yang baik, namun rendahnya parameter *Value* menghasilkan presentasi galat sebesar 13.02%. Mengetahui nilai galat tersebut masih berada di atas ambang batas toleransi 10% maka sistem menginisiasi tindakan korektif secara adaptif dengan menambahkan 3,00 gram cat putih. Lalu pada iterasi kedua, pencampuran cat putih tersebut berhasil menaikkan parameter *Value* menjadi 127.0, namun persentasi galat masih terhitung sebesar 12,91%. Sistem kemudian merespon Kembali dengan penambahan 1.00 gram cat putih serta 3 gram cat biru. Maka pada iterasi ketika, perpaduan komposisi tersebut menggeser nilai HSV aktual secara optimal ke angka (133.0, 40.0, 126.5) yang secara signifikan mereduksi galat menjadi 4,22% sehingga sistem mengunci status menjadi warna sesuai.

Fenomena multi-iterasi tersebut membuktikan keandalan mekanisme perlindungan pada algoritma yang dirancang secara konservatif (*anti-overshoot*). Sistem secara berkala menghindari penambahan cat koreksi dalam jumlah besar secara sekaligus untuk mencegah kondisi *overshoot*, di mana warna dapat menjadi terlalu pudar mengingat fluida yang tertuang tidak dapat ditarik kembali. Koreksi

bervolume kecil dan bertahap memberikan durasi yang cukup bagi agitator mekanik untuk menghomogenkan fluida secara sempurna sebelum evaluasi visual dilakukan. Dinamika tersebut mampu melakukan pengambilan keputusan adaptif untuk menjamin presisi dan kualitas hasil akhir.

4.5.5 Evaluasi Sensitivitas Proporsi Ekstrem Pada Target Hijau Zaitun

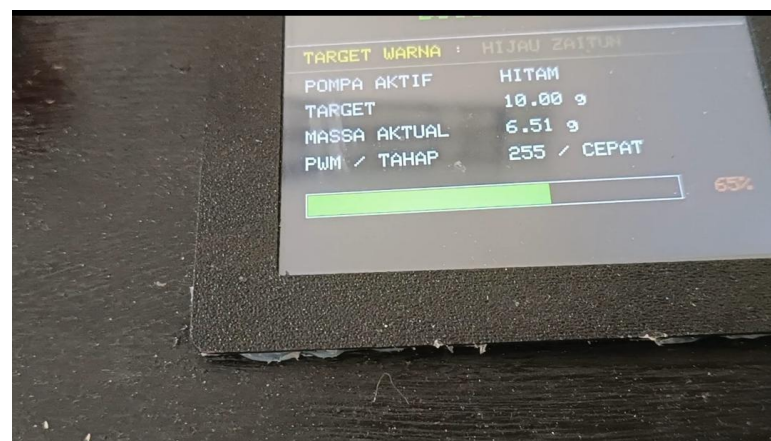
Pengujian warna *earth tone* "Hijau Zaitun" menjadi parameter ujian terberat bagi kapabilitas resolusi sensor *load cell* pada mikrokontroler dan sensitivitas piksel pada modul kamera mikrokomputer. Formulasi warna ini dirancang dengan rasio dominasi yang sangat ekstrem, yakni pencampuran 490 gram pigmen Kuning murni dengan dosis pigmen penggelap (*shading*) Hitam yang sangat kecil, yakni hanya 10 gram. Tantangan krusial pada pengujian ini terletak pada karakteristik pigmen Hitam; apabila aktuator mengalami *overshoot* mekanis (menuangkan lebih dari 10 gram akibat lambatnya respons katup), parameter kecerahan (*Value*) cairan akan seketika jatuh (*drop*) dan merusak rona kuning terang secara permanen tanpa bisa dikembalikan.



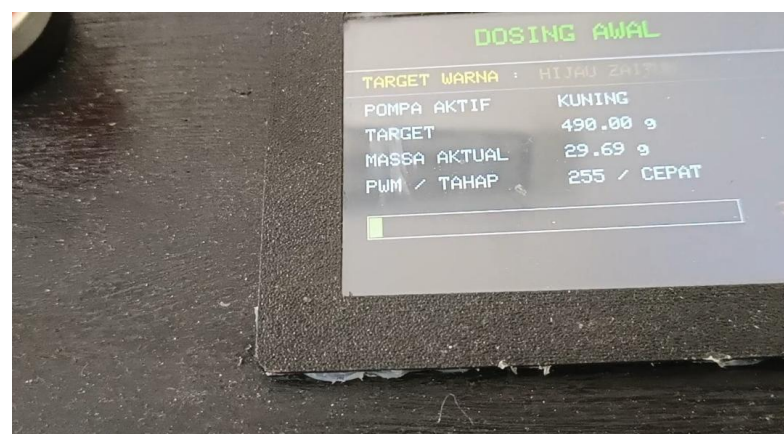
Gambar 4.45 Tampilan HMI Untuk Warna Hijau Zaitun



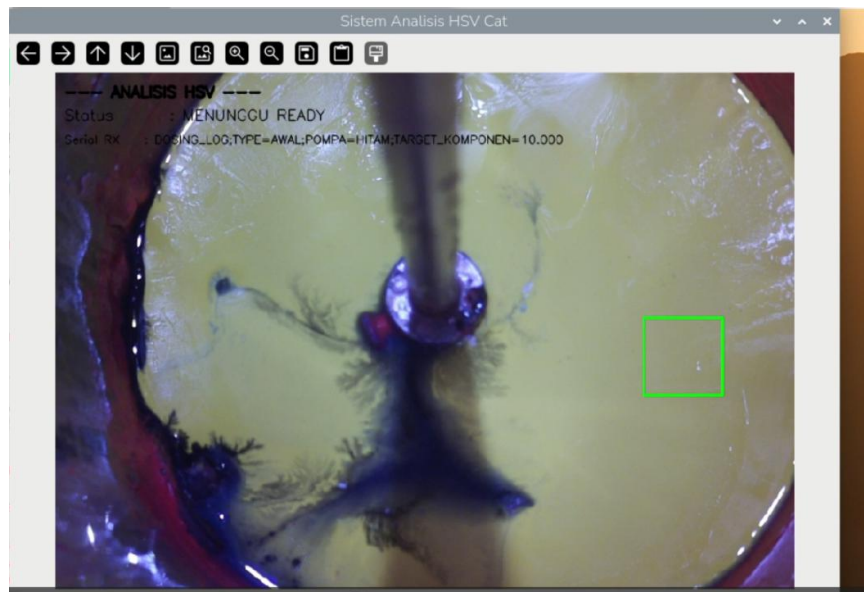
Gambar 4.46 Tampilan HMI Target Komposisi Untuk Warna Hijau Zaitun



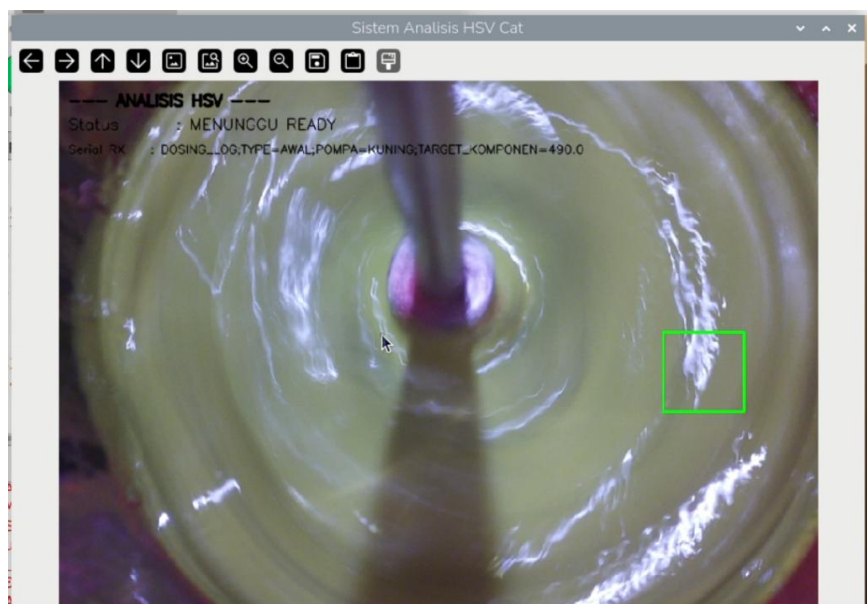
Gambar 4.47 Dosing Awal Warna Hitam Untuk Target Warna Hijau Zaitun
Sebanyak 10 Gram



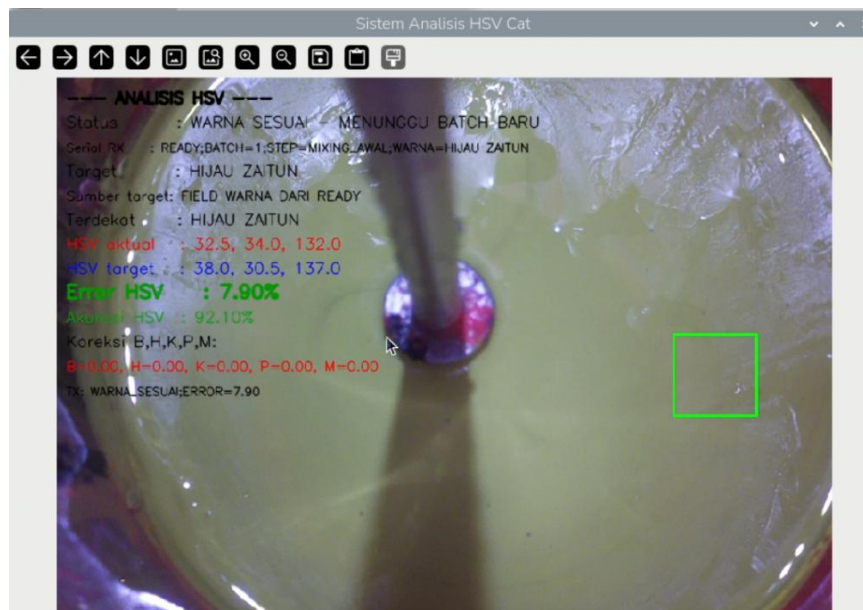
Gambar 4.48 Dosing Awal Warna Kuning Untuk Target Warna Hijau Zaitun
Sebanyak 10 Gram



Gambar 4.49 Inisialisasi Awal Warna, Pencampuran Antara 10 Gram Hitam, dan 490 Gram Kuning



Gambar 4.50 Penambahan Warna Kuning



Gambar 4.51 Hasil Pencampuran Warna Dengan Target Hijau Zaitun, Akurasi Sebesar 92.10%

Berdasarkan hasil pemantauan terintegrasi, mikrokontroler berhasil mengeksekusi penuangan 10 gram pigmen Hitam dengan sangat presisi melalui pengaturan PWM bertahap. Setelah proses homogenisasi dilakukan, Raspberry Pi mengeksekusi algoritma *Spatial Filtering* untuk memfokuskan sensor pada area tengah pusaran cat. Sistem visi komputer berhasil mengenali pergeseran ruang warna kuning kecoklatan secara akurat, mendeteksi nilai deviasi optis pada angka 7.90% (dengan metrik HSV aktual 32.5, 34.0, 132.0 terhadap target 38.0, 30.5, 137.0).

Oleh karena rentang ini telah berada di bawah batas ambang toleransi maksimum ($\leq 10\%$), komputasi kendali secara langsung memvalidasi campuran tersebut sebagai sebuah keberhasilan mutlak pada iterasi pertama, menghasilkan tingkat akurasi optik sebesar 92.10%. Hasil ini membuktikan bahwa tidak terjadi kelebihan dosis mekanis pada saat aktuatur bekerja. Siklus pun ditutup dengan penyerahan perintah kepada Arduino untuk menampilkan status sukses, menahan sistem selama 2 detik dari pergerakan mekanis, dan mengeksekusi pengurisan

produk akhir melalui pompa diafragma hingga secara otomatis berhenti pada kapasitas absolut 120 gram.

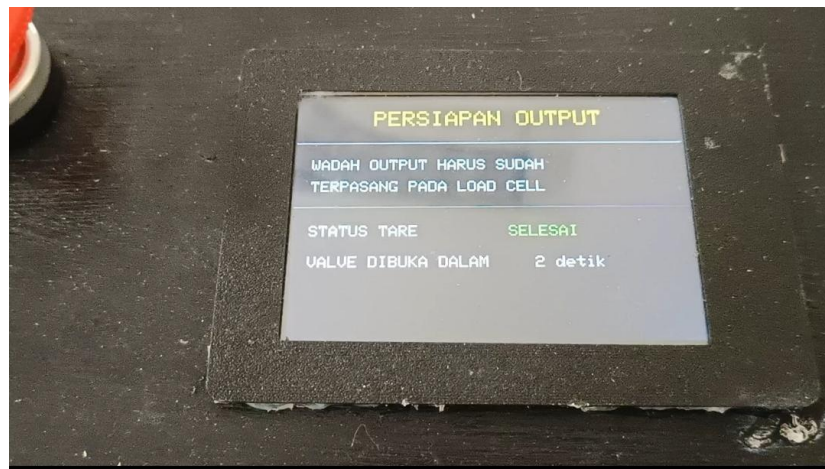
4.6 Pengujian Sistem Pengeluaran Cat Akhir Otomatis Berdasarkan Massa

Setelah algoritma visi komputer menyatakan bahwa hasil pencampuran telah memenuhi Tingkat akurasi yang ditentukan ($\text{error} \leq 10\%$), Raspberry Pi mengirimkan data WARNA_SESUAI kepada Arduino Mega Pro Mini melalui komunikasi serial. Data tersebut menjadi penanda bahwa seluruh proses koreksi warna telah selesai sehingga sistem dapat memasuki tahap akhir, yaitu proses pengeluaran produk (dispensing).

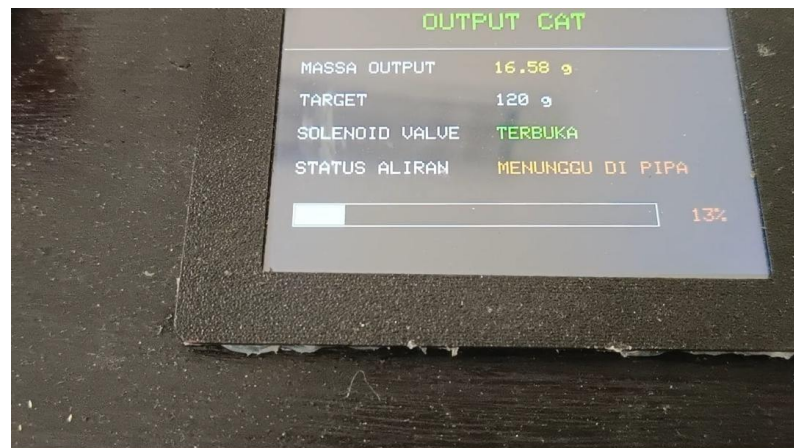
Pada tahap ini, Arduino memberi dan menampilkan informasi “WARNA SESUAI” dan “MENGELUARKAN CAT” pada layer LCD TFT sebagai indikator bahwa proses koreksi telah selesai. Setelah notifikasi tersebut ditampilkan, sistem memberikan waktu tunda (*delay*) selama 2 detik sebelum aktuator diaktifkan. Penundaan ini bertujuan sebagai kesempatan agar aliran fluida dalam tangka menjadi lebih stabil setelah proses pengadukan dihentikan, sehingga pembacaan massa pada *load cell* tidak dipengaruhi oleh riak (*surface turbulence*) maupun getaran mekanik yang tersisa



Gambar 4.52 Warna Sesuai



Gambar 4.53 Persiapan Ouput Dengan *Delay* 2 Detik



Gambar 4.54 Ouput Cat Keluar, dan Solenoid Terbuka

Selama masa tunggu, seluruh aktuator berada pada kondisi nonaktif. Setelah waktu tunda berakhir maka Arduino memberikan sinyal logika HIGH pada rangkaian driver MOSFET sehingga pompa diafragma memperoleh catu daya 12Volt dan mulai bekerja sebagai aktuator valve untuk mengeluarkan cat menuju wadah penampung. Bersamaa dengan proses tersebut, *load cell* melakukan pembacaan massa secara kontinu menggunakan modul HX711 sebagai umpan balik (*feedback*) pada sistem kendali tertutup.



Gambar 4.55 Proses Keluaran Cat

Selama pompa diafragma beroperasi, Arduino secara terus-menerus membandingkan hasil pembacaan load cell dengan nilai referensi sebesar 120 gram. Ketika massa cat yang terdeteksi telah mencapai atau melebihi nilai tersebut, mikrokontroler segera menonaktifkan sinyal kendali MOSFET sehingga pompa diafragma berhenti secara otomatis. Dengan terputusnya catu daya pompa, aliran cat menuju wadah penampung juga berhenti sehingga massa produk akhir dipertahankan pada nilai target sebesar 120 gram. Mekanisme ini memastikan bahwa proses dispensing tidak bergantung pada pengaturan waktu (timer), melainkan berdasarkan hasil pengukuran massa secara langsung sehingga tingkat akurasi pengeluaran produk menjadi lebih tinggi.



Gambar 4.56 Pembacaan Load Cell 120 Gram, dan Valve Tertutup

Hasil pengujian menunjukkan bahwa mekanisme dispensing otomatis mampu bekerja sesuai dengan urutan logika sistem yang telah dirancang. Status WARNA_SESUAI diterima dengan baik oleh Arduino, notifikasi pada LCD TFT muncul sebelum proses dispensing dimulai, waktu tunggu selama 2 detik berhasil dijalankan, pompa diafragma aktif setelah MOSFET menerima sinyal kendali, dan pompa berhenti secara otomatis ketika load cell mendeteksi massa keluaran sebesar 120 gram. Dengan demikian, proses akhir sistem berlangsung sepenuhnya secara otomatis tanpa memerlukan intervensi operator serta mampu menghasilkan volume keluaran yang konsisten pada setiap siklus pengujian.



Gambar 4.57 Proses Selesai, dan Cat Siap Diambil



Gambar 4.58 Perbandingan Berat Cat Pada Keluaran *Load Cell* Pada Timbangan Konvensional

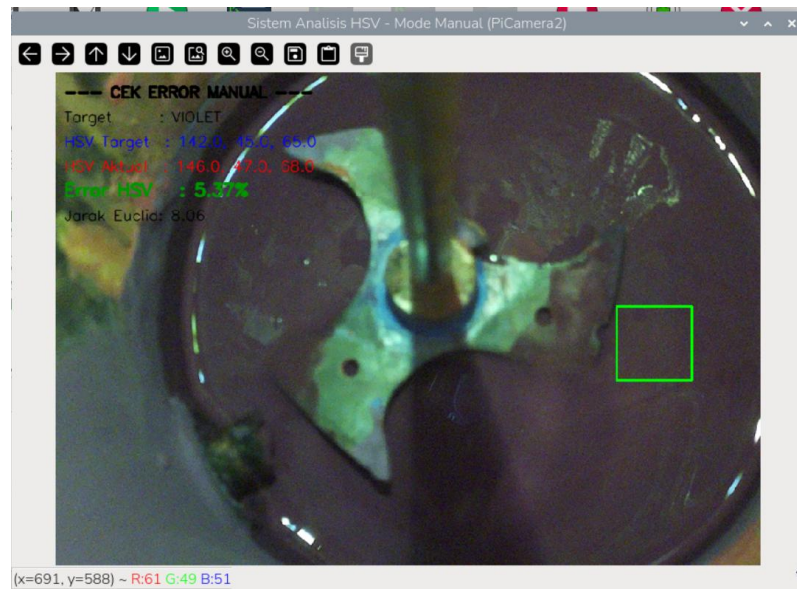
Pengujian akurasi pembacaan sensor *load cell output* dilakukan melalui metode validasi silang dengan membandingkan massa aktual cat yang terukur pada sistem terhadap alat ukur standar berupa timbangan *digital* pembanding. Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan melalui gambar 4.33, sistem menampilkan informasi bahwa proses pengeluaran cat telah selesai dilakukan dengan massa *output* sebesar 120,97 gram pada layer TFT. Ketika wadah tersebut ditimbang kembali menggunakan timbangan digital pembanding, diperoleh hasil pembacaan massa sebesar 121 gram.

Hasil pembandingan kedua instrumen menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat tinggi dengan selisih mutlak (*absolute error*) hanya sebesar 0,03 gram, atau setara dengan persentase selisih sebesar 0,025%. Perbedaan sebesar 0,03 gram tersebut terjadi akibat perbedaan resolusi tampilan (*display resolution*) pada kedua instrumen. Sensor *load cell* sistem memiliki tingkat ketelitian hingga dua digit desimal (0,01 gram), sedangkan timbangan pembanding memiliki resolusi pembacaan sebesar 1 gram tanpa desimal. Oleh karena itu, nilai 120,97 gram dari sistem secara otomatis mengalami pembulatan matematis ke atas (*rounding up*)

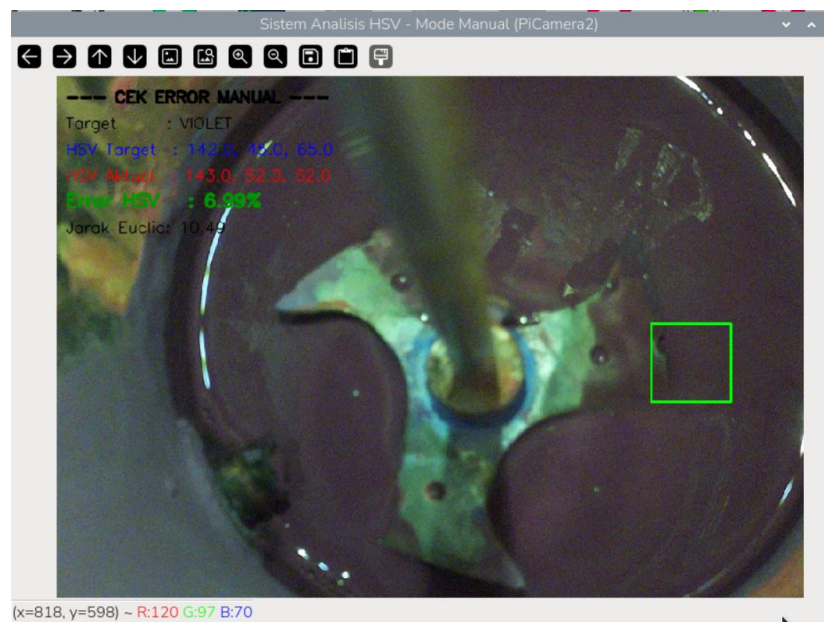
menjadi 121 gram pada layar timbangan pembanding. Tingginya tingkat kesesuaian antara kedua pembacaan ini membuktikan bahwa sensor *load cell* output beserta algoritma pengkondisi sinyal pada alat telah terkalibrasi dengan baik. Selisih pembacaan yang berada jauh di bawah batas toleransi sistem (7%) menegaskan bahwa data massa keluaran cat yang dicatat oleh sistem bersifat akurat, presisi, dan teruji secara empiris.

4.7 Analisis Pengaruh Kontaminasi Residu Terhadap Degradasi Parameter Ruang Warna

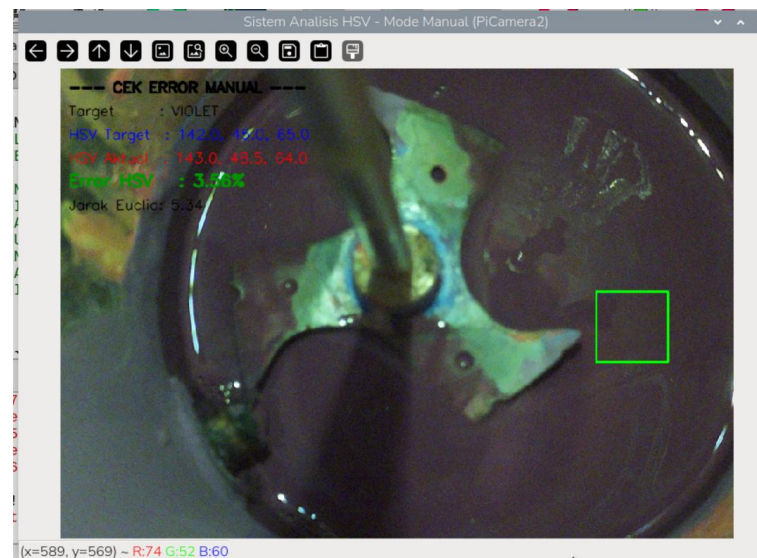
Dalam pengujian performa sistem pencampuran cat, algoritma kompensasi berbasis ruang warna HSV telah menunjukkan kemampuan yang baik dalam mencapai target rona warna utama (Hue). Berdasarkan pengujian mode manual untuk target warna Violet secara 3x berturut setelah melakukan percobaan beda warna sebelumnya (Hijau Zaitun) menunjukkan hasil yang cukup kontras terhadap perbedaan pembacaan warna dan target HSV yang dicapai. Pembacaan sensor kamera menunjukkan bahwa nilai Hue aktual berada pada rentang 143 hingga 146.0, angka tersebut secara komputasional masuk ke dalam spektrum warna violet pada standar HSV OpenCV (rentang 1250150). Hasil tersebut membuktikan bahwa proporsi dasar dari pigmen penyusunan warna telah dihitung dan dituang secara baik oleh sistem. Namun hasil rona warna yang telah tercapai, terjadi deviasi visual yang signifikan pada hasil akhir pencampuran, yang menunjukkan hasil cat terlihat jauh lebih gelap dan keruh dibandingkan warna Violet yang ditargetkan, meskipun menggunakan persentase campuran yang sama.



Gambar 4.59 Percobaan Pertama Pengaruh Kontaminasi Residu



Gambar 4.60 Percobaan kedua Pengaruh Kontaminasi Residu



Gambar 4.61 Percobaan Ketika Pengaruh kontaminasi Residu

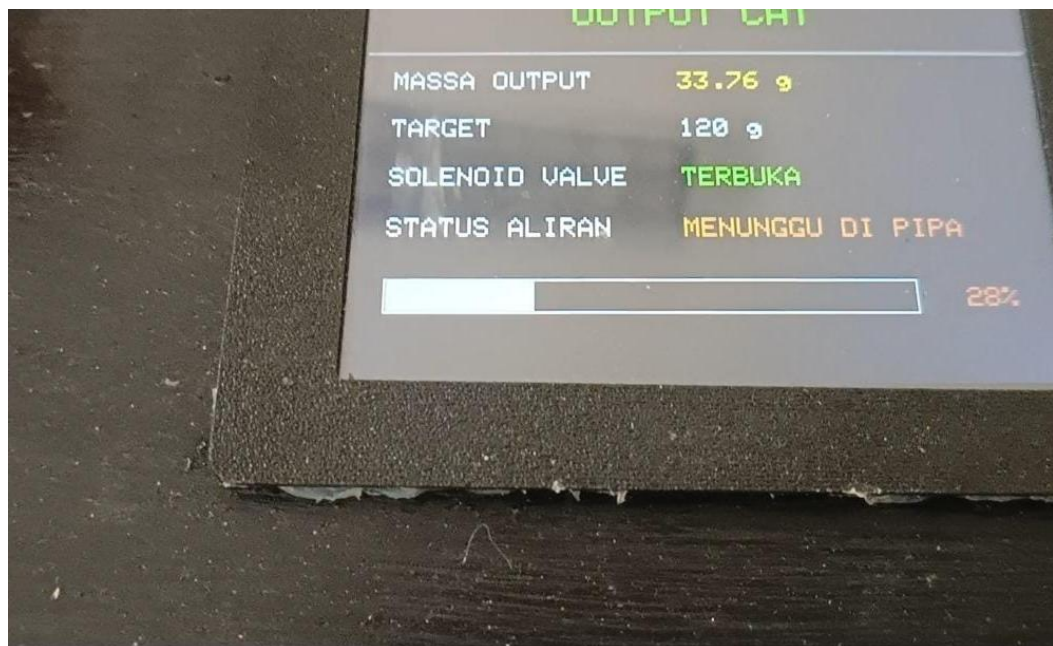
Perbedaan visual tersebut teridentifikasi melalui jatuhnya parameter *Value* pada pembacaan aktual sistem. Berdasarkan data pengujian, nilai *Value* aktual berada pada angka 62.0 hingga 68.0, terdegradasi secara drasis dari rentang kecerahan ideal yang seharusnya dicapai. Setelah dilakukan pemantauan terhadap perangkat keras pencampuran, degradasi nilai kecarahan ini terbukti bukan diakibatkan oleh kesalahan kalkulasi jarak *Euclidean* maupun kelemahan sensor visual, namun disebabkan oleh factor kontaminasi silang mekanis. Terdapat residu cat berwarna hijau dari siklus pengujian sebelumnya yang masih menempel pada bilah pengaduk.

Secara teori pencampuran pigmen (subtraktif), hijau dan ungu merupakan warna yang saling berlawanan atau komplementer. Ketika bilah pengaduk diaktifkan untuk menghomogenkan pigmen Violet yang baru dituang, residu cat hijau tersebut ikut terlarut ke dalam campuran. Percampuran pigmen komplementer ini secara langsung menetralkan intensitas warna satu sama lain, sehingga menghasilkan warna yang cenderung kecokelatan, lumpur, atau sangat gelap. Fenomena fisik inilah yang secara akurat ditangkap oleh kamera dan diterjemahkan oleh sistem sebagai penurunan drastis pada parameter *Value* tanpa mengubah parameter *Hue* secara radikal.

Hasil analisis ini memberikan Kesimpulan terhadap batasan operasional alat yang dirancang serta kelemahan perancangan sistem ini yang belum terdapat sistem *autocleaning* sistem. Kepresisian algoritma *Iterative Proportional* dalam menghitung gramasi kompensasi cat juga harus didukung oleh kondisi aktuator yang steril. ntuk menjaga ketetapan parameter HSV dari warna target secara keseluruhan, sistem otomasi ini sangat rentan terhadap residu pigmen, sehingga mengindikasikan perlunya penambahan mekanisme pembersihan (*flushing*) atau prosedur standardisasi kebersihan wadah dan pengaduk di antara dua proses pencampuran dengan target warna yang berbeda.

4.8 Evaluasi Waktu Tempuh (Priming Time) dan Pengaruh Viskositas Pada Pengeluaran Cat

Perbedaan waktu yang tercatat pada antarmuka sistem dan pembacaan aktual *load cell* pada dasarnya disebabkan oleh berbedanya titik awal pengukuran yang digunakan oleh kedua antarmuka tersebut. Waktu tempuh yang ditampilkan layar HMI merepresentasikan durasi total keseluruhan sistem, yang dihitung sejak perintah eksekusi dikirimkan hingga seluruh siklus pengisian benar-benar dinyatakan selesai. Durasi tersebut mencakup jeda komunikasi serial dari mikrokontroler, waktu respon pompa diafragma, serta proses awal pemompaan fluida dari tangki.



Gambar 4.62 Keluaran Awal Cat Pada Sistem Satu Siklus



Gambar 4.63 Proses Selesai Pada Sistem Keluaran Cat

Sebaliknya, waktu yang tercatat pada *load cell* umumnya merupakan waktu murni pengisian atau selisih waktu yang mulai dihitung tepat saat teteas cat pertama menyentuh wadah hingga massa target terpenuhi. Hal tersebut yang menyebabkan waktu pengisian pada pembacaan *load cell* terlihat jauh lebih singkat.

Perbedaan karakteristik waktu tempuh ini dapat dianalisis secara langsung melalui rentetan data pengujian bertahap mulai dari target 40 gram hingga 180 gram. Pada tahap paling awal, pengeluaran cat untuk target 40 gram memakan waktu yang sangat lama, yakni mencapai 26,07 detik. Hal ini berkaitan erat dengan fase *priming*; di mana jalur perpipaan masih dalam kondisi kosong. Pompa harus bekerja ekstra keras mengalahkan viskositas dan gaya inersia fluida kental untuk mendorong udara dan mengisi seluruh volume selang sebelum tetesan cat pertama menyentuh wadah (terkonfirmasi oleh status "menunggu di pipa" pada sistem). Setelah selang terisi penuh (*primed*), kinerja sistem menjadi jauh lebih responsif dan efisien. Hal ini terbukti pada sekuens target berikutnya, di mana pengeluaran 80 gram hanya membutuhkan waktu 6,14 detik, dan target 140 gram tercapai dalam waktu 9,27 detik.

```
=====
SUCCESS: TARGET 180 GRAM TERCAPAI!
Hasil Timbangan : 179.60 gram
Waktu Tempuh   : 40.89 detik
=====

=====
REKAPITULASI HASIL PENGUJIAN
=====
Target (g) | Hasil Aktual (g) | Waktu (s)
-----
40 g      | 39.80 g          | 2.04 s
80 g      | 81.46 g          | 2.75 s
140 g     | 140.80 g         | 5.27 s
180 g     | 179.60 g         | 40.89 s
=====
Pengujian selesai. Tekan [ENTER] untuk RESET dari awal.
```

Gambar 4.64 Percobaan Keluaran Dengan Perbedaan Berat Mulai Dari 40, 80,140, dan 180 Gram

Faktor tambahan yang turut memperpanjang total waktu eksekusi adalah implementasi algoritma *dosing* itu sendiri, yang terlihat jelas pada pencapaian target 180 gram dengan total waktu 40,89 detik, maupun saat dibandingkan dengan

pengujian tunggal pada target 120 gram. Waktu yang dibutuhkan untuk volume besar ini tidak berjalan linier secara matematis karena sistem tidak memompa cat dengan debit penuh hingga detik terakhir. Demi mencapai presisi timbangan yang tinggi dan mencegah terjadinya *overshoot* (kelebihan muatan), algoritma secara otomatis mengurangi laju aliran atau mengatur ritme mati-nyala pompa diafragma menjelang angka target tercapai. Proses penyesuaian laju aliran secara perlahan di akhir siklus inilah yang menambah akumulasi waktu eksekusi secara signifikan, menjadikannya lebih lama dibandingkan kecepatan aliran murni di fase pertengahan.

Selain dari faktor kontrol peranti lunak, desain geometri 3D dari konstruksi wadah dan kendala mekanis fluida turut memengaruhi efisiensi debit keluaran cat. Penempatan tabung pencampur yang diposisikan tegak lurus ke atas tanpa kemiringan menyebabkan tidak adanya bantuan gaya gravitasi atau dorongan ke bawah (*downward pressure*) untuk mengalirkan cairan cat pekat secara alami ke arah lubang pengeluaran (*drat*). Ditambah lagi dengan desain bagian tutup wadah yang tidak tertutup kedap (masih terdapat rongga udara terbuka), proses pengadukan yang intens menghasilkan gelembung-gelembung udara (*air bubbles*) di dalam matriks cat yang sudah bercampur. Adanya gelembung udara yang terperangkap ini memicu terjadinya *cavitation* atau penurunan efisiensi isap (*suction performance*) pada pompa diafragma. Pompa tidak hanya menyedot fluida murni, melainkan juga campuran udara, sehingga laju aliran fluida konstan dari *drat* menuju wadah akhir terhambat dan secara langsung menambah akumulasi waktu penuangan secara keseluruhan. Hal tersebut juga terlihat jelas dari tabel 4.2 dibawah

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Keluaran Cat

Target (g)	Hasil Aktual (g)	Waktu (s)
40	39.80	2.04
80	81.46	2.75
140	140.80	5.27
180	179.60	40.89

Meskipun dinamika fluida dan penyesuaian laju aliran pada akhir siklus membutuhkan waktu eksekusi yang lebih lama, kombinasi kendala mekanis dan ritme algoritma ini berhasil menghasilkan tingkat kepresisian penakaran massa yang sangat tinggi. Hal ini dibuktikan dengan pencapaian batas toleransi sistem yang sangat presisi. Nilai 0,03 gram bukanlah perubahan dari 1 gram, melainkan nilai *absolute error* (selisih mutlak) antara pembacaan akhir sistem (120,97 gram) dengan alat ukur timbangan digital konvensional (121 gram). Selisih yang sangat kecil ini membuktikan bahwa akurasi sistem penakaran *load cell* memiliki simpangan yang mendekati nol, sehingga kompensasi massa cat tetap dapat dipertanggungjawabkan secara kuantitatif.

Pada perancangan sistem penakaran otomatis ini, tolak ukur keluaran cat yang dieksekusi oleh sensor *load cell* ditetapkan pada massa absolut sebesar 120 gram untuk setiap satu siklus pencampuran. Namun, parameter ini perlu ditinjau ulang saat dikonversi ke dalam satuan volume (mL). Hubungan antara massa (m), densitas (ρ), dan volume (V) dirumuskan secara matematis melalui persamaan 2.4. Perubahan nilai densitas dari setiap varian warna cat akan secara langsung memengaruhi total volume cairan akhir yang tertampung pada wadah penadah, meskipun massanya terukur sama persis pada angka 120 gram.

Penentuan nilai densitas cat pada sistem ini mengacu pada standar spesifikasi bahan baku cat pelapis berbasis air (*water-based acrylic emulsion*), yang secara empiris memiliki rentang densitas antara 1,05 g/mL hingga 1,40 g/mL. Rentang nilai ini dipengaruhi oleh proporsi fraksi massa antara pelarut dan pigmen penyusunnya. Pelarut air dan resin emulsi dasar memiliki densitas yang lebih rendah ($\approx 1,00 - 1,05$ g/mL), sehingga campuran cat yang dominan encer akan mendekati batas bawah 1,05 g/mL dan menghasilkan volume penadahan yang lebih besar, yakni mencapai 114,28 mL. Sebaliknya, pigmen pekat seperti Titanium Dioksida (TiO_2) pada pigmen putih memiliki bobot jenis yang jauh lebih tinggi ($\approx 4,23$ g/mL). Ketika sistem melakukan penambahan pigmen pekat secara dominan, densitas campuran akan meningkat hingga mencapai 1,40 g/mL, yang berdampak

pada menyusutnya volume fluida menjadi 85,71 mL untuk target massa yang sama. Dalam pengujian sistem ini, bahan baku cat dasar ditakar sebanyak 1 kg (1.000 gram) yang kemudian diencerkan menggunakan air dengan persentase viskositas sebesar 15% (150 gram air), sehingga menghasilkan massa dasar campuran sebesar 1.150 gram. Penambahan air ($\rho = 1,00 \text{ g/mL}$) secara matematis menurunkan densitas awal cat murni ($\rho \approx 1,30 \text{ g/mL}$) menjadi nilai densitas dasar baru sebesar $\approx 1,251 \text{ g/mL}$.

Selama proses koreksi warna berjalan, penambahan pigmen pekat menyebabkan pergeseran densitas akhir campuran berada pada rentang 1,25 g/mL hingga 1,38 g/mL. Varian warna cair yang didominasi pigmen organik (seperti Hitam atau Biru) berada pada batas bawah ($\approx 1,25 \text{ g/mL}$), sedangkan warna yang membutuhkan penambahan pigmen Putih (TiO_2 , $\rho \approx 4,23 \text{ g/mL}$) bergeser ke batas atas ($\approx 1,38 \text{ g/mL}$). Berdasarkan rentang densitas spesifik ini, penakaran massa absolut 120 gram oleh sistem *load cell* akan menghasilkan rentang volume penadahan fisik sebesar 88,88 mL hingga 96,00 mL. Temuan kuantitatif ini mempertegas bahwa penakaran gravimetrik (gram) jauh lebih konsisten menolak fluktuasi volume akibat pengenceran 15% air dan gelembung udara, serta memastikan bahwa wadah penadah dengan kapasitas 100 – 150 mL sudah sangat aman untuk menampung seluruh keluaran cat tanpa risiko meluap.