

## **BAB IV**

### **PENGUJIAN DAN ANALISA**

#### **4.1. Gambaran Umum Hasil Perancangan**

Hasil perancangan yang telah dilakukan pada penelitian ini direalisasikan menjadi sebuah sistem pencampuran cat otomatis yang terdiri atas perangkat keras dan perangkat lunak yang saling terintegrasi. Sistem menggunakan arduino mega pro mini 2560 sebagai pengendali utama, lima pompa peristaltik sebagai aktuator penyalur cat, *load cell* sebagai sensor pengukuran massa, motor pengaduk, serta LCD TFT sebagai antarmuka. Perangkat lunak mengimplementasikan metode *Sequential Control*, *PWM Two-stage Dosing*, dan *Gravimetric Dosing* untuk mengatur urutan pencampuran, kecepatan pompa, dan penghentian proses berdasarkan massa aktual.

Setelah seluruh komponen direalisasikan dan diintegrasikan, sistem mampu melaksanakan proses pemilihan warna, penakaran komposisi cat, pencampuran, koreksi warna berdasarkan hasil deteksi HSV, hingga menghasilkan keluaran berupa cat dengan massa dan komposisi sesuai target. Selanjutnya dilakukan pengujian terhadap setiap bagian sistem untuk mengevaluasi kinerja, akurasi, dan keandalan implementasi yang telah dirancang.

#### **4.2. Hasil Realisasi Perangkat Lunak**

Subbab ini membahas hasil realisasi perangkat lunak pada sistem pencampuran cat otomatis. Perangkat lunak dibuat untuk mengatur proses pemilihan warna, pembacaan komposisi cat, tampilan LCD TFT, pengendalian pompa secara berurutan, pengaturan PWM, pembacaan massa berbasis *load cell*, pengendalian motor pengaduk, serta komunikasi data koreksi warna antara raspberry Pi dan arduino.

##### **4.2.1. Hasil Tampilan Menu LCD TFT**

Pengujian tampilan LCD TFT *Touchscreen* dilakukan untuk mengetahui apakah antarmuka pengguna dapat menampilkan informasi sistem dengan jelas dan sesuai dengan tahapan kerja alat. LCD TFT digunakan sebagai media utama untuk menampilkan menu input pemilihan warna, komposisi bahan, status proses, peringatan error, dan informasi akhir ketika proses pencampuran selesai. Tampilan awal antarmuka pengguna pada LCD TFT ditunjukkan pada Gambar 4.1.



**Gambar 4. 1.** Tampilan awal LCD TFT *Touchscreen*

Gambar 4.1 menunjukkan tampilan awal sistem saat LCD TFT pertama kali diaktifkan. Pada saat sistem pertama kali dinyalakan, LCD menampilkan tampilan awal atau splash screen. Tampilan ini berfungsi sebagai indikator bahwa sistem telah aktif dan program berhasil berjalan. Setelah tampilan awal selesai, sistem masuk ke halaman menu utama untuk pemilihan warna. Dengan adanya splash screen, pengguna dapat mengetahui bahwa LCD TFT dan sistem kontrol telah melakukan inisialisasi sebelum digunakan.

Berikutnya, tampilan menu pemilihan warna halaman pertama ditunjukkan pada Gambar 4.2.



**Gambar 4. 2.** Tampilan menu pemilihan warna halaman pertama

Pada Gambar 4.2 ditampilkan halaman pertama menu pemilihan warna yang dapat dipilih pengguna. Menu pemilihan warna menampilkan daftar warna target yang dapat dipilih oleh operator. Warna yang ditampilkan pada menu merupakan warna hasil campuran, sedangkan warna dasar seperti merah, kuning, biru, hitam, dan putih tidak ditampilkan sebagai pilihan warna target. Warna dasar tersebut tetap digunakan sebagai bahan utama pada pompa untuk membentuk warna campuran. Pada halaman ini, operator dapat memilih warna target melalui tombol pada layar sentuh.

Berikutnya, tampilan menu pemilihan warna halaman kedua ditunjukkan pada Gambar 4.3.



**Gambar 4. 3.** Tampilan menu pemilihan warna halaman kedua

Selanjutnya, Gambar 4.3 memperlihatkan halaman kedua dari menu pemilihan warna. Karena jumlah warna target lebih banyak daripada jumlah tombol yang tersedia dalam satu halaman, tampilan menu warna dibuat menjadi beberapa halaman. Tombol NEXT digunakan untuk menampilkan halaman warna berikutnya, sedangkan tombol BACK digunakan untuk kembali ke halaman sebelumnya. Pengaturan halaman ini membuat tampilan LCD tidak terlalu padat dan tetap mudah digunakan oleh operator. Tampilan komposisi bahan warna yang telah dipilih ditunjukkan pada Gambar 4.4.



**Gambar 4. 4.** Tampilan komposisi bahan warna pada LCD TFT

Gambar 4.4 memperlihatkan komposisi warna yang akan diproses oleh sistem. Setelah operator memilih salah satu warna target, LCD menampilkan halaman komposisi bahan warna. Halaman ini berisi nama warna yang dipilih, daftar bahan cat dasar yang digunakan, serta massa masing-masing bahan dalam satuan gram. Tampilan komposisi bahan berfungsi untuk memberikan informasi kepada operator mengenai resep warna sebelum proses dijalankan.

Berikutnya, tampilan komposisi bahan warna yang telah dipilih ditunjukkan pada Gambar 4.5.



**Gambar 4. 5.** Tampilan status pengecekan *load cell*

Sebelum proses dimulai, Gambar 4.5 menunjukkan tahap pengecekan kondisi load cell. Sebelum proses pengisian bahan dimulai, sistem melakukan pengecekan terhadap *load cell* dan modul HX711. Tampilan ini menunjukkan bahwa sistem sedang memastikan sensor berat berada dalam kondisi normal sebelum proses dosing dilakukan. Pengecekan ini diperlukan karena proses pengisian bahan cat bergantung pada pembacaan massa. Jika *load cell* tidak terbaca, nilai massa tidak stabil, atau pembacaan berada di luar batas normal, sistem tidak melanjutkan proses pengisian.

Berikutnya, tampilan status pengecekan kondisi load cell ditunjukkan pada Gambar 4.6.



**Gambar 4. 6.** Tampilan peringatan *load cell* error pada LCD TFT

Apabila terjadi kesalahan pembacaan, Gambar 4.6 menunjukkan tampilan peringatan yang diberikan sistem. LCD menampilkan pesan error. Tampilan ini dapat berisi informasi seperti *load cell* Error, Periksa Sensor, Dan Proses Berhenti. Pesan tersebut menunjukkan bahwa sistem mendeteksi adanya masalah pada sensor berat atau pembacaan HX711. Pada kondisi ini, proses dihentikan agar pompa tidak berjalan tanpa data massa yang valid.

Berikutnya, tampilan peringatan ketika terjadi error pada load cell ditunjukkan pada Gambar 4.7.



**Gambar 4. 7.** Tampilan proses dosing awal

Setelah seluruh parameter sesuai, Gambar 4.7 menunjukkan proses dosing awal yang dijalankan sistem. Pada proses dosing awal, LCD menampilkan informasi bahan cat yang sedang dikeluarkan, pompa yang sedang aktif, target massa bahan, dan progress bar. Tampilan ini berfungsi sebagai media monitoring agar operator dapat mengetahui proses pengisian bahan secara langsung. Setiap bahan warna ditampilkan secara berurutan sesuai dengan resep yang telah dipilih sebelumnya.

Berikutnya, tampilan antarmuka pada saat proses mixing berlangsung ditunjukkan pada Gambar 4.8.



**Gambar 4. 8.** Tampilan proses mixing pada LCD TFT

Gambar 4.8 memperlihatkan proses pengadukan setelah seluruh bahan selesai ditakar. Setelah seluruh bahan cat selesai dikeluarkan, LCD menampilkan halaman proses mixing. Tampilan ini menunjukkan bahwa sistem sedang mencampurkan bahan cat di dalam *mixing tank*. Pada halaman ini dapat ditampilkan informasi waktu atau status mixing agar operator mengetahui bahwa sistem masih berada pada tahap pencampuran. Tampilan mixing menjadi penanda bahwa proses belum selesai dan cat masih dalam tahap homogenisasi.

Berikutnya, tampilan antarmuka pada saat sistem melakukan analisis warna ditunjukkan pada Gambar 4.9.



**Gambar 4. 9.** Tampilan proses analisis warna

Setelah proses mixing selesai, Gambar 4.9 menunjukkan tahap analisis warna. Setelah proses mixing awal selesai, LCD menampilkan halaman analisis warna. Halaman ini menunjukkan bahwa sistem sedang mengevaluasi hasil pencampuran warna. Pada sistem yang terhubung dengan kamera dan raspberry Pi, tahap ini digunakan untuk membandingkan warna hasil pencampuran dengan warna target. Tampilan ini memberi informasi bahwa sistem sedang menentukan apakah warna sudah sesuai atau masih memerlukan koreksi.

Berikutnya, hasil analisis warna yang ditampilkan pada layar ditunjukkan pada Gambar 4.10.



**Gambar 4. 10.** Tampilan hasil analisis warna

Hasil analisis warna ditampilkan pada Gambar 4.10. pada LCD dalam bentuk informasi warna target, nilai error, dan status kesesuaian warna. Nilai error digunakan sebagai acuan untuk menentukan apakah hasil pencampuran sudah berada dalam batas toleransi. Jika nilai error masih lebih besar dari batas yang ditentukan, sistem menampilkan status bahwa warna perlu dikoreksi. Jika nilai error sudah berada dalam batas toleransi, sistem dapat melanjutkan proses menuju tahap output.

Berikutnya, tampilan antarmuka pada saat proses koreksi warna berlangsung ditunjukkan pada Gambar 4.11.



**Gambar 4. 11.** Tampilan koreksi warna pada LCD TFT

Jika warna hasil pencampuran belum sesuai dengan target, Gambar 4.11 menunjukkan informasi koreksi yang diberikan sistem. LCD menampilkan halaman koreksi warna. Halaman ini menampilkan warna tambahan yang perlu dimasukkan ke dalam *mixing tank*. Tampilan koreksi warna membantu operator mengetahui bahwa sistem sedang melakukan penyesuaian warna sebelum hasil akhir dinyatakan sesuai. Setelah warna koreksi ditambahkan, sistem kembali melakukan mixing ulang agar warna tambahan tercampur merata.

Berikutnya, Tampilan proses kerja pompa koreksi warna ditunjukkan pada Gambar 4.12.



**Gambar 4. 12.** Tampilan proses pompa koreksi warna

Gambar 4.12 memperlihatkan proses dosing koreksi berdasarkan hasil analisis warna. Pada tahap pompa koreksi, LCD menampilkan informasi pompa koreksi yang sedang aktif dan target massa koreksi. Tampilan ini menunjukkan bahwa sistem sedang menambahkan warna tertentu dalam jumlah kecil sesuai kebutuhan koreksi. Informasi ini penting karena proses koreksi membutuhkan ketelitian lebih tinggi dibandingkan pengisian awal.

Berikutnya, tampilan antarmuka pada saat proses output cat berlangsung ditunjukkan pada Gambar 4.13.



**Gambar 4. 13.** Tampilan proses output cat

Setelah warna hasil pencampuran dinyatakan sesuai, Gambar 4.13 menunjukkan proses pengeluaran cat. LCD menampilkan halaman output cat. Pada halaman ini, sistem menampilkan status solenoid valve output dan massa cat yang keluar. Tampilan massa output digunakan untuk memantau jumlah cat yang dikeluarkan dari *mixing tank*. Jika massa output belum mencapai target, tampilan proses output tetap berjalan. Jika massa sudah sesuai target, sistem melanjutkan ke status berikutnya. Tampilan ketika seluruh proses telah selesai ditunjukkan pada Gambar 4.14.



**Gambar 4. 14.** Tampilan proses selesai pada LCD TFT

Gambar 4.14 menunjukkan tampilan system Setelah proses output selesai, LCD menampilkan status proses selesai. Tampilan ini menjadi indikator bahwa seluruh tahapan, mulai dari pemilihan warna, penampilan komposisi bahan, dosing, mixing, analisis warna, koreksi, hingga output cat telah selesai dilakukan. Dengan tampilan ini, operator dapat mengetahui bahwa sistem sudah tidak lagi berada dalam proses aktif. Tampilan notifikasi bahwa cat sudah siap diambil ditunjukkan pada Gambar 4.15.



**Gambar 4. 15.** Tampilan cat siap diambil

Tahap terakhir pada Proses ditunjukkan pada Gambar 4.15, tampilan LCD adalah informasi bahwa cat siap diambil. Tampilan ini menunjukkan bahwa hasil pencampuran sudah selesai dan cat dapat diambil oleh operator. Setelah informasi ini ditampilkan selama beberapa detik, sistem kembali ke menu pemilihan warna sehingga alat dapat digunakan kembali untuk proses pencampuran berikutnya.

#### **4.2.2. Implementasi *Sequential Control* pada Urutan Pengeluaran Cat**

Metode *Sequential Control* diimplementasikan sebagai logika utama untuk mengatur urutan pengeluaran cat dari lima pompa peristaltik. Penerapan metode ini bertujuan agar setiap pompa bekerja secara bergantian sesuai komposisi warna yang telah ditentukan sehingga proses dosing berlangsung secara sistematis dan tidak terjadi aktivasi pompa secara bersamaan. Implementasi metode ini mengacu pada prinsip *Sequential Control* yang menjalankan proses berdasarkan urutan kondisi yang telah ditetapkan.

Pada tahap implementasi, arduino mega pro mini menerima data komposisi warna hasil pemilihan pengguna melalui antarmuka LCD TFT. Sistem kemudian menghitung massa target setiap warna dasar dan memeriksa apakah nilai target lebih besar dari nol. Apabila kondisi tersebut terpenuhi, pompa yang bersesuaian diaktifkan terlebih dahulu menggunakan metode *Gravimetric Dosing* hingga massa target tercapai. Setelah pompa pertama selesai bekerja, sistem berpindah ke pompa berikutnya sesuai urutan yang telah diprogram hingga seluruh komponen warna selesai dikeluarkan.

Implementasi tersebut membentuk mekanisme kerja berurutan pada proses pencampuran cat sehingga setiap tahapan dosing dilakukan secara terstruktur sebelum sistem melanjutkan ke proses pengadukan. Evaluasi terhadap keberhasilan urutan aktivasi pompa berdasarkan berbagai komposisi warna dibahas pada Subbab 4.5.1

#### **4.2.3. Implementasi PWM Control pada Pompa Peristaltik**

Pengendalian *Pulse Width Modulation* (PWM) diimplementasikan pada setiap pompa peristaltik untuk mengatur kecepatan putaran motor DC selama proses dosing. Pengaturan nilai PWM dilakukan melalui keluaran PWM arduino mega pro mini menuju rangkaian driver MOSFET sehingga tegangan efektif yang diterima motor dapat diatur sesuai kebutuhan sistem. Penerapan metode PWM bertujuan menghasilkan

pengendalian laju aliran yang lebih fleksibel sebagai dasar pelaksanaan proses *Gravimetric Dosing*.

Pada implementasinya, sistem menerapkan mekanisme *Two-stage Dosing* yang terdiri atas tahap pengisian cepat dan tahap pengisian presisi. Selama selisih antara massa aktual dan massa target masih berada di atas nilai ambang yang telah ditentukan, pompa bekerja menggunakan nilai PWM tinggi untuk mempercepat proses pengisian. Ketika massa aktual telah mendekati massa target, sistem secara otomatis menurunkan nilai PWM sehingga laju aliran menjadi lebih kecil dan proses penambahan massa dapat berlangsung lebih terkendali. Perubahan nilai PWM dilakukan berdasarkan pembacaan massa aktual dari sensor *load cell* yang diproses secara kontinu oleh arduino.

Implementasi pengendalian PWM tersebut membentuk mekanisme pengaturan kecepatan pompa yang mendukung proses dosing berbasis massa. Analisis mengenai hubungan antara variasi nilai PWM terhadap debit aliran pompa, kestabilan aliran, dan jumlah massa cat yang dihasilkan dibahas pada Subbab 4.4

#### **4.2.4. Implementasi *Gravimetric Dosing* Berbasis *load cell***

*Gravimetric Dosing* diterapkan dengan menggunakan *load cell* sebagai sensor umpan balik massa. Sebelum proses dimulai, sistem melakukan tare ketika *mixing tank* masih kosong. Selanjutnya, target massa ditentukan berdasarkan komposisi cat yang akan ditambahkan.

Selama proses dosing, arduino membandingkan massa aktual dengan batas switch dan batas stop. Pembacaan massa tersebut digunakan untuk menentukan kecepatan pompa dan waktu penghentian. Pada proses *sequential*, tare tidak dilakukan kembali pada setiap pergantian pompa. Target komponen berikutnya dihitung secara kumulatif berdasarkan massa aktual terakhir.

### **4.3. Hasil Pengukuran *load cell* pada *mixing tank***

#### **4.3.1. Hasil Pengujian Kalibrasi dan Validasi Sensor *load cell***

Setelah nilai offset dan faktor kalibrasi ditentukan dengan menggunakan referensi beban kerja yang digunakan, pengujian dilakukan dengan membandingkan beban asli terhadap berat terbaca hasil konversi sensor. Pengujian dilakukan pada rentang beban

0–7000 g atau 0% - 70%. Rentang ini masih berada di bawah kapasitas maksimum sensor *load cell* 10 kg, sehingga masih sesuai untuk melihat karakteristik pembacaan sensor pada area kerja yang aman. Hasil kalibrasi load cell menggunakan beban acuan 10 kg disajikan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4. 1.** Hasil Kalibrasi 10 kg

| No | Beban Asli<br>(g) | RAW HX711<br>(Data Mentah) | Massa Terbaca Hasil<br>Konversi (g) | Error<br>(%) |
|----|-------------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------|
| 1  | 0                 | -376024                    | 0                                   | -            |
| 2  | 1000              | -180096                    | 1000                                | 0            |
| 3  | 2000              | 15799                      | 2000                                | 0            |
| 4  | 3000              | 211530                     | 2999                                | 0.03         |
| 5  | 4000              | 407785                     | 4001                                | 0.03         |
| 6  | 5000              | 603320                     | 4999                                | 0.02         |
| 7  | 6000              | 799271                     | 5999                                | 0.02         |
| 8  | 7000              | 995520                     | 7001                                | 0.01         |

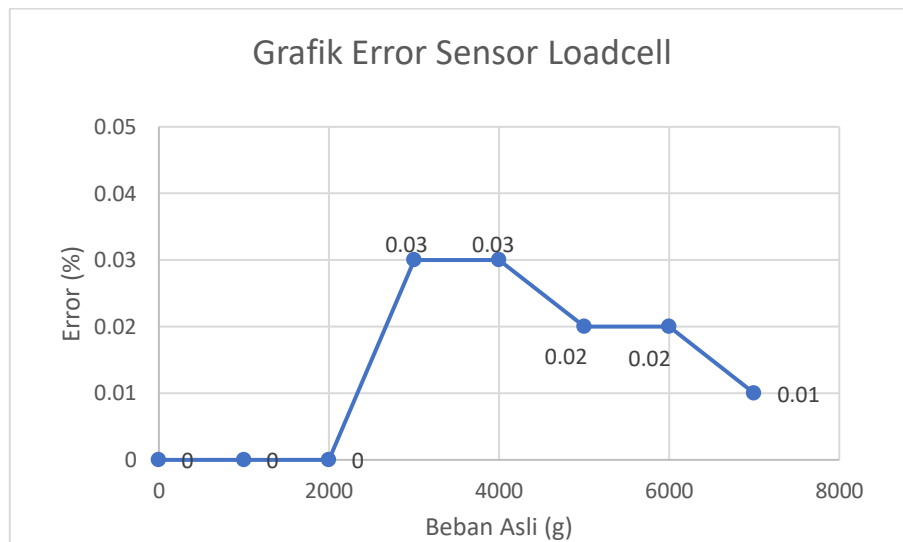
Untuk beban 0 g, error ditulis 0,00% karena pembacaan sensor juga menunjukkan 0 g setelah proses kalibrasi.

Berdasarkan tabel 4.1, error tertinggi terjadi pada beban 3000 g dan 4000 g, yaitu sebesar 0,03%. Nilai tersebut masih sangat kecil jika dibandingkan dengan beban yang diuji. Rata-rata error pada rentang 1000–7000 g adalah sekitar 0,016%, sehingga secara umum sensor menunjukkan hasil pengukuran yang baik setelah proses kalibrasi. Pada beberapa penelitian berbasis *load cell* dan HX711, performa sensor umumnya dianalisis menggunakan persentase error terhadap beban acuan, karena error dapat menunjukkan seberapa dekat hasil pembacaan sensor terhadap nilai standar.

Grafik pada gambar 4.19. error sensor *load cell* menunjukkan nilai penyimpangan pembacaan massa terhadap beban asli pada rentang pengujian 0–7000 g. Berdasarkan grafik, nilai error pada beban 0 g, 1000 g, dan 2000 g berada pada 0,00%, yang menunjukkan bahwa pembacaan sensor pada titik tersebut sesuai dengan beban acuan.

Hal ini dapat terjadi karena titik 0 g digunakan sebagai offset, sedangkan beban 2000 g digunakan sebagai titik utama dalam penentuan faktor kalibrasi.

Pada beban 3000 g dan 4000 g, error meningkat menjadi 0,03%. Nilai ini merupakan error tertinggi pada pengujian, tetapi masih sangat kecil karena selisih pembacaan hanya sekitar 1 g dari beban asli. Setelah itu, error menurun pada beban 5000 g dan 6000 g menjadi 0,02%, kemudian kembali turun pada beban 7000 g menjadi 0,01%. Pola ini menunjukkan bahwa pembacaan sensor tetap stabil meskipun beban dinaikkan hingga 7 kg. Hasil pengujian error pembacaan sensor load cell ditampilkan dalam grafik pada Gambar 4.16.



**Gambar 4. 16.** Grafik error sensor *load cell* 10 kg

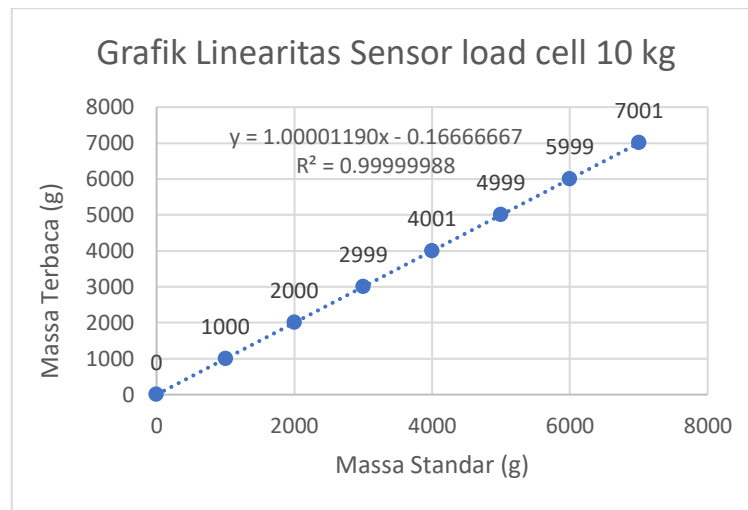
Gambar 4.16 menunjukkan grafik error hasil pengujian load cell. Pada beban 3000 g dan 4000 g, error meningkat menjadi 0,03%. Nilai ini merupakan error tertinggi pada pengujian, tetapi masih sangat kecil karena selisih pembacaan hanya sekitar 1 g dari beban asli. Setelah itu, error menurun pada beban 5000 g dan 6000 g menjadi 0,02%, kemudian kembali turun pada beban 7000 g menjadi 0,01%. Pola ini menunjukkan bahwa pembacaan sensor tetap stabil meskipun beban dinaikkan hingga 7 kg.

Secara keseluruhan, error maksimum yang diperoleh hanya sebesar 0,03%, sedangkan rata-rata error pada rentang 1000–7000 g adalah sekitar 0,016%. Nilai error yang kecil ini menunjukkan bahwa proses kalibrasi menggunakan nilai RAW tanpa beban dan RAW pada beban 2000 g mampu menghasilkan pembacaan massa yang

akurat pada rentang pengujian. Perbedaan kecil yang muncul pada beban 3000 g hingga 7000 g masih tergolong wajar karena pembacaan *load cell* dapat dipengaruhi oleh resolusi sensor, kestabilan mekanik, noise kecil pada HX711, serta proses pembulatan hasil pembacaan ke satuan gram.

#### 4.3.1.1. Grafik Validasi Linearitas hasil kalibrasi Sensor

Hubungan antara beban asli dan hasil pembacaan sensor dianalisis menggunakan grafik linearitas. Grafik linearitas digunakan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam merespons perubahan massa secara proporsional. Hasil pengujian linearitas sensor load cell ditampilkan dalam grafik pada Gambar 4.17.



**Gambar 4. 17.** Grafik Linearitas 10 kg

Hubungan linear hasil pengukuran ditunjukkan pada Gambar 4.17. Grafik linearitas sensor digunakan untuk melihat hubungan antara beban asli dengan berat terbaca. Pada grafik ini, sumbu X menunjukkan beban asli dalam satuan gram, sedangkan sumbu Y menunjukkan berat terbaca setelah nilai RAW dikonversi menggunakan faktor kalibrasi. Grafik linearitas diperlukan untuk memastikan bahwa hasil pembacaan sensor meningkat sebanding dengan penambahan beban.

Berdasarkan hasil pengujian, grafik linearitas menunjukkan pola garis yang hampir lurus dari beban 0 g hingga 7000 g. Kondisi ini menunjukkan bahwa pembacaan sensor memiliki hubungan yang linear terhadap beban yang diberikan. Linearitas ini penting pada sistem pencampuran cat otomatis karena massa bahan yang masuk ke wadah harus

dibaca secara bertahap dan akurat. Jika sensor tidak linear, maka kesalahan pembacaan dapat meningkat pada beban tertentu dan dapat memengaruhi akurasi takaran cat.

Pada data pengujian, berat terbaca hanya berbeda sekitar 1 g dari beban asli pada beberapa titik, yaitu 3000 g, 4000 g, 5000 g, 6000 g, dan 7000 g. Selisih tersebut menghasilkan error yang sangat kecil, yaitu antara 0,01% sampai 0,03%. Dengan demikian, grafik linearitas mendukung bahwa *load cell* 10 kg yang digunakan masih memiliki respons pembacaan yang stabil pada rentang uji 0–7 kg.

Berdasarkan hasil regresi linier, diperoleh persamaan  $y = 1,0000119x - 0,1667$  dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,999999884. Nilai  $R^2$  menunjukkan tingkat kesesuaian antara massa standar sebagai variabel independen dengan massa hasil pembacaan *load cell* sebagai variabel dependen. Nilai  $R^2$  yang mendekati 1 menunjukkan bahwa model regresi linier memiliki kecocokan yang sangat baik terhadap data, sehingga hubungan antara massa referensi dan hasil pembacaan *load cell* dapat direpresentasikan secara sangat linier. Menurut Schober dkk. (2018), semakin mendekati nilai 1, hubungan linear antarvariabel semakin kuat. Oleh karena itu, nilai  $R^2$  yang diperoleh menunjukkan bahwa hasil pembacaan *load cell* memiliki kesesuaian yang sangat baik terhadap massa referensi dan model regresi yang digunakan mampu merepresentasikan hubungan kedua variabel secara akurat. Dengan nilai  $R^2 = 0,999999884$ , Hal ini menunjukkan bahwa model regresi mampu menjelaskan sekitar 99,9999884% variasi data hasil pembacaan sensor, sedangkan sisa variasi yang tidak dapat dijelaskan oleh model linier sangat kecil dan Menurut Fambudi dkk. (2025), salah satu faktor yang memengaruhi hasil pembacaan *load cell* adalah noise pada proses akuisisi sinyal, yang dapat menyebabkan pembacaan menjadi kurang stabil sehingga masih terdapat sedikit selisih terhadap nilai sebenarnya. Selain itu, Hakim dkk. (2025) menyatakan bahwa hasil pengukuran *load cell* juga dapat dipengaruhi oleh posisi dan distribusi beban pada sensor serta kondisi lingkungan selama proses pengukuran.

#### 4.3.2. Hasil Pengujian Akurasi dan presisi Pembacaan Massa

Setelah karakteristik konversi dan linearitas sensor dievaluasi pada rentang 0–7000 g, pengujian selanjutnya difokuskan pada rentang kerja aktual sistem pencampuran.

Pengujian akurasi dan presisi dilakukan pada beban 500 g, 1000 g, 1500 g, dan 2000 g karena rentang tersebut mewakili massa kerja *mixing tank* selama proses pencampuran cat. Pada setiap titik beban dilakukan lima kali pengukuran untuk mengetahui kedekatan hasil pembacaan terhadap massa standar serta konsistensi pembacaan sensor secara berulang. Akurasi dianalisis berdasarkan nilai rata-rata, selisih massa, persentase error, dan persentase akurasi, sedangkan presisi dianalisis menggunakan standar deviasi dan koefisien variasi. Hasil lima kali percobaan pembacaan load cell disajikan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4. 2.** Hasil 5 percobaan *load cell*

| No | Beban Standar<br>(g) | P1 (g)  | P2 (g)  | P3 (g)  | P4 (g)  | P5 (g)  |
|----|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1  | 0                    | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 2  | 500                  | 500.77  | 500.72  | 500.76  | 500.57  | 500.59  |
| 3  | 1000                 | 1000.89 | 1000.65 | 1000.47 | 1000.60 | 1000.55 |
| 4  | 1500                 | 1499.85 | 1500.07 | 1499.49 | 1500.36 | 1500.32 |
| 5  | 2000                 | 2000.40 | 2000.01 | 2000.24 | 2000.19 | 2000.29 |

#### 4.3.3.1. Pengujian akurasi *load cell*

Berdasarkan hasil pengujian, akurasi *load cell* 10 kg dianalisis dengan membandingkan nilai rata-rata pembacaan sensor terhadap beban standar. Pengujian dilakukan pada beban 500 g, 1000 g, 1500 g, dan 2000 g dengan lima kali pengambilan data pada setiap titik beban. Parameter yang digunakan untuk menilai akurasi adalah selisih pembacaan, persentase error, dan persentase akurasi. Analisis akurasi pembacaan load cell pada beban 10 kg disajikan pada Tabel 4.3.

**Tabel 4. 3.** Analisis Akurasi *load cell* 10 kg

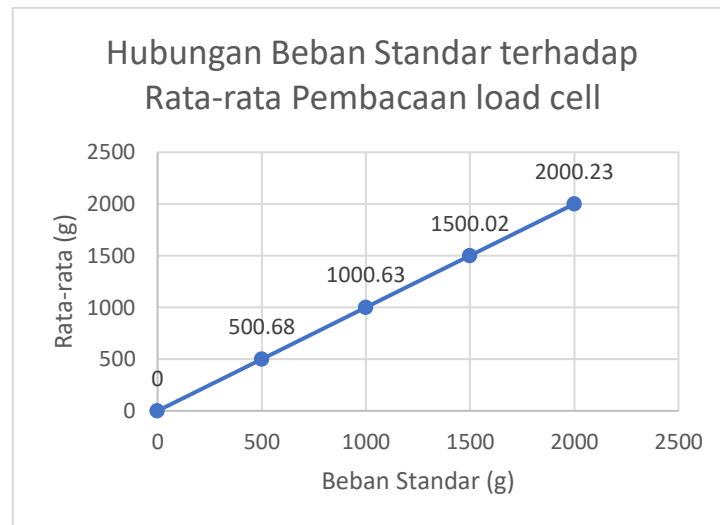
| Beban<br>Standar (g) | Rata-rata<br>(g) | Selisih<br>(g) | Error<br>(%) | Akurasi<br>(%) |
|----------------------|------------------|----------------|--------------|----------------|
| 500                  | 500.68           | 0,68           | 0,14         | 99,86          |
| 1000                 | 1000.63          | 0,63           | 0,06         | 99,94          |
| 1500                 | 1500.02          | 0,02           | 0,00         | 100,00         |

|      |         |      |      |       |
|------|---------|------|------|-------|
| 2000 | 2000.23 | 0,23 | 0,01 | 99,99 |
|------|---------|------|------|-------|

Perhitungan akurasi sensor disajikan pada Tabel 4.3. Pada beban 500 g, rata-rata pembacaan *load cell* sebesar 500,68 g dengan selisih 0,68 g terhadap massa referensi. Nilai error yang diperoleh sebesar 0,14%, sehingga akurasi pembacaan mencapai 99,86%. Nilai tersebut merupakan error terbesar di antara seluruh titik pengujian. Meskipun demikian, penyimpangan yang terjadi masih kurang dari 1 g, sehingga menunjukkan bahwa hasil pengukuran masih sangat mendekati massa referensi.

Pada beban 1000 g, rata-rata pembacaan *load cell* sebesar 1000,63 g dengan nilai error 0,06% dan akurasi 99,94%. Hasil ini menunjukkan bahwa pembacaan sensor pada beban 1 kg telah mendekati massa standar dengan tingkat penyimpangan yang sangat kecil.

Selanjutnya, pada beban 1500 g, rata-rata pembacaan *load cell* sebesar 1500,02 g dengan nilai error yang mendekati 0%, sehingga pembacaan sensor hampir identik dengan massa referensi. Pada beban 2000 g, rata-rata pembacaan sebesar 2000,23 g dengan error 0,01% dan akurasi 99,99%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor tetap mampu mempertahankan tingkat akurasi yang sangat tinggi pada beban yang lebih besar. Hubungan antara beban standar dan hasil pembacaan sensor ditampilkan dalam grafik pada Gambar 4.18.



**Gambar 4. 18.** Grafik hubungan beban standar terhadap rata rata pembacaan loadacell

Gambar 4.18 memperlihatkan hubungan antara beban standar dan hasil pembacaan sensor. Secara keseluruhan, seluruh titik pengujian menghasilkan nilai error yang sangat rendah dengan akurasi di atas 99%. Error maksimum yang diperoleh hanya sebesar 0,14%, sehingga *load cell* 10 kg yang digunakan mampu melakukan pengukuran massa secara akurat pada rentang pengujian 500 g hingga 2000 g.

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan beberapa penelitian terdahulu yang menggunakan kombinasi *load cell* dan HX711 sebagai sistem pengukuran massa. Hartanto dan Saputra memperoleh akurasi sebesar 99,039% dengan error 0,961% pada timbangan digital berbasis *load cell* dan HX711. Sementara itu, Mukhammad dkk. melaporkan error terbaik sebesar 0,01% pada beban 1000 g dan error terbesar 4,66% pada beban 50 g dalam penelitian analisis modul HX711 untuk timbangan bayi. Apabila dibandingkan dengan kedua penelitian tersebut, error maksimum pada penelitian ini yang hanya sebesar 0,14% masih berada pada rentang yang lebih kecil, sehingga menunjukkan bahwa performa akurasi sistem pengukuran yang dikembangkan tergolong sangat baik.

Berdasarkan hasil pengujian, masih terdapat persentase error yang relatif kecil pada setiap titik pengukuran. Kondisi ini merupakan hal yang wajar pada sistem pengukuran berbasis *load cell*. Menurut Fambudi dkk. (2025), salah satu faktor yang memengaruhi

hasil pembacaan *load cell* adalah noise pada proses akuisisi sinyal, yang dapat menyebabkan pembacaan menjadi kurang stabil sehingga masih terdapat sedikit selisih terhadap nilai sebenarnya. Selain itu, Hakim dkk. (2025) menyatakan bahwa hasil pengukuran *load cell* juga dapat dipengaruhi oleh posisi dan distribusi beban pada sensor serta kondisi lingkungan selama proses pengukuran. Oleh karena itu, meskipun sensor telah melalui proses kalibrasi, masih dimungkinkan terdapat penyimpangan yang kecil antara hasil pembacaan dan massa referensi. Namun demikian, Berdasarkan konsep metrologi yang dijelaskan oleh Georgiev dkk. (2021), measurement accuracy menunjukkan tingkat kedekatan hasil pengukuran terhadap nilai referensi, sedangkan measurement error digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi tingkat akurasi tersebut. Maka, semakin kecil nilai *measurement error*, semakin baik tingkat akurasi suatu sistem pengukuran. Nilai error maksimum sebesar 0,14% yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa proses kalibrasi telah menghasilkan pembacaan yang sangat mendekati massa referensi, sehingga sistem layak digunakan sebagai umpan balik (*feedback*) pada metode *Gravimetric Dosing*.

#### 4.3.3.2. Pengujian presisi *load cell*

Presisi *load cell* 10 kg dianalisis berdasarkan kestabilan hasil pembacaan berulang pada beban yang sama. Berbeda dengan akurasi yang membandingkan hasil pembacaan terhadap beban standar, presisi menunjukkan seberapa konsisten sensor membaca nilai massa ketika pengujian dilakukan secara berulang. Pada pengujian ini, presisi dianalisis menggunakan nilai standar deviasi dari lima kali pengambilan data pada setiap titik beban. Analisis presisi pembacaan *load cell* pada beban 10 kg disajikan pada Tabel 4.4.

**Tabel 4. 4.** Analisis Presisi *load cell* 10 kg

| Beban Standar<br>(g) | Standar Deviasi<br>(g) | CV berdasarkan<br>rata-rata (%) | Keterangan             |
|----------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 500                  | 0,10                   | 0,019                           | Variasi relatif rendah |

|      |      |       |                        |
|------|------|-------|------------------------|
| 1000 | 0,16 | 0,016 | Variasi relatif rendah |
| 1500 | 0,36 | 0,024 | Variasi relatif rendah |
| 2000 | 0,14 | 0,007 | Variasi relatif rendah |

Nilai presisi hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.4. Pada beban 500 g, standar deviasi pembacaan sebesar 0,10 g. Nilai tersebut menunjukkan bahwa variasi antar percobaan relatif kecil. Menurut JCGM (2008), standar deviasi hasil pengukuran berulang digunakan untuk menggambarkan penyebaran hasil pengukuran akibat variasi acak (random variation), sehingga semakin kecil nilai standar deviasi menunjukkan semakin kecil penyebaran data pengukuran.

Pada beban 1000 g, standar deviasi yang diperoleh sebesar 0,16 g. Meskipun terdapat variasi antar percobaan, penyimpangan tersebut masih relatif kecil. Selanjutnya, pada beban 1500 g, standar deviasi pembacaan sebesar 0,36 g, yang merupakan nilai terbesar di antara seluruh titik pengujian. Namun, jika dibandingkan dengan massa referensi 1500 g, penyebaran hasil pengukuran tersebut tetap relatif kecil. Pada beban 2000 g, standar deviasi sebesar 0,14 g, sehingga penyebaran hasil pengukuran kembali menurun.

Secara keseluruhan, nilai standar deviasi berada pada rentang 0,10–0,36 g. Berdasarkan konsep standar deviasi yang dijelaskan oleh Budiono dkk. (2024), rentang tersebut menunjukkan bahwa hasil pengukuran memiliki penyebaran yang rendah terhadap nilai rata-ratanya, sehingga pengukuran dapat dikatakan memiliki presisi yang baik.

Nilai koefisien variasi berada pada rentang 0,007% sampai 0,024%. Koefisien variasi tertinggi terdapat pada beban 1500 g, yaitu sebesar 0,024%, sedangkan nilai terendah terdapat pada beban 2000 g, yaitu sebesar 0,007%. Secara keseluruhan, rata-rata koefisien variasi pembacaan *load cell* sebesar 0,017% menunjukkan bahwa pembacaan *load cell* memiliki tingkat presisi yang baik pada rentang beban kerja 500–

2000 g. Menurut Suherman dan Kudus (2024), koefisien variasi (*coefficient of variation*) merupakan ukuran variasi relatif yang digunakan untuk menggambarkan tingkat keragaman suatu kumpulan data terhadap nilai rata-ratanya. Semakin kecil nilai koefisien variasi, maka semakin tinggi tingkat konsistensi atau presisi hasil pengukuran. Dengan demikian, nilai koefisien variasi yang diperoleh pada penelitian ini mengindikasikan bahwa sistem pengukuran massa berbasis *load cell* mampu menghasilkan pembacaan yang konsisten pada setiap pengulangan pengukuran.

#### **4.4. Hasil Pengujian Pompa Peristaltik**

Pengujian pompa peristaltik dilakukan untuk mengetahui respons pompa terhadap variasi nilai PWM serta menentukan nilai PWM yang digunakan sebagai tahap pengisian cepat dan tahap pengisian presisi pada sistem gravimetric dosing. Pompa peristaltik bekerja menggunakan motor DC sebagai penggerak utama. Ketika sinyal PWM diberikan oleh mikrokontroler melalui rangkaian driver, daya rata-rata yang diterima motor DC berubah sesuai nilai duty cycle sehingga kecepatan putaran motor ikut berubah. Putaran motor tersebut diteruskan melalui mekanisme gearbox menuju roller pompa yang berfungsi menekan selang secara berulang. Tekanan roller terhadap selang menyebabkan fluida terdorong menuju mixing tank, sehingga perubahan kecepatan putaran motor akan memengaruhi debit cat yang keluar dari pompa.

Pada pengujian ini dilakukan penentuan PWM cepat dan PWM presisi berdasarkan respons keluaran pompa. PWM cepat digunakan pada tahap awal pengisian ketika selisih massa cat terhadap target masih besar, sehingga diperlukan debit aliran yang lebih tinggi untuk mempercepat proses dosing. Sementara itu, PWM presisi digunakan ketika massa cat telah mendekati nilai target agar penambahan massa dapat dikontrol dengan lebih teliti dan mengurangi kemungkinan terjadinya overshoot akibat sisa aliran pompa.

Berdasarkan hasil pengujian respons motor terhadap variasi nilai PWM, pompa belum mampu mengeluarkan cairan pada PWM 50, PWM 75, dan PWM 100. Cairan mulai keluar secara stabil pada PWM 120, sehingga nilai tersebut digunakan sebagai batas minimum PWM kerja pompa sekaligus acuan tahap pengisian presisi. Kondisi respons motor terhadap variasi nilai PWM yang diberikan disajikan pada Tabel 4.5.

**Tabel 4. 5.** Kondisi motor terhadap PWM

| PWM | Kondisi Motor | Cairan Keluar |
|-----|---------------|---------------|
| 50  | Berdengung    | Tidak         |
| 75  | Berdengung    | Tidak         |
| 100 | Berdengung    | Tidak         |
| 120 | Berputar      | Ya            |
| 150 | Berputar      | Ya            |
| 180 | Berputar      | Ya            |
| 210 | Berputar      | Ya            |
| 255 | Berputar      | Ya            |

#### 4.4.1. Pengujian Debit Aliran Cat pada Setiap Pompa

Pengujian debit pompa peristaltik dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi nilai PWM terhadap massa cat yang dikeluarkan oleh pompa. Perubahan nilai PWM akan memengaruhi *duty cycle* sinyal kendali motor DC sehingga kecepatan putaran motor meningkat. Menurut Rifdian dan Hartono (2018), peningkatan nilai PWM menyebabkan peningkatan kecepatan putar motor DC. Pada pompa peristaltik, peningkatan putaran motor menyebabkan roller menekan selang lebih cepat sehingga debit fluida yang dialirkan menjadi lebih besar.

Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi PWM sebesar 120, 150, 180, 210, dan 255 pada setiap pompa peristaltik. Sebelum pengujian, dilakukan proses tare untuk menghilangkan massa awal wadah. Setiap nilai PWM dijalankan selama 10 detik, kemudian massa cat yang keluar dicatat melalui pembacaan timbangan dan digunakan untuk menghitung debit dalam satuan gram per detik.

Setiap pompa diuji sebanyak tiga kali pada masing-masing nilai PWM untuk memperoleh hasil yang lebih stabil. Data hasil pengujian digunakan untuk mengetahui karakteristik debit masing-masing pompa, menentukan pengaruh PWM terhadap keluaran pompa, serta menjadi dasar pemilihan PWM cepat dan PWM presisi pada metode *Gravimetric Dosing*.

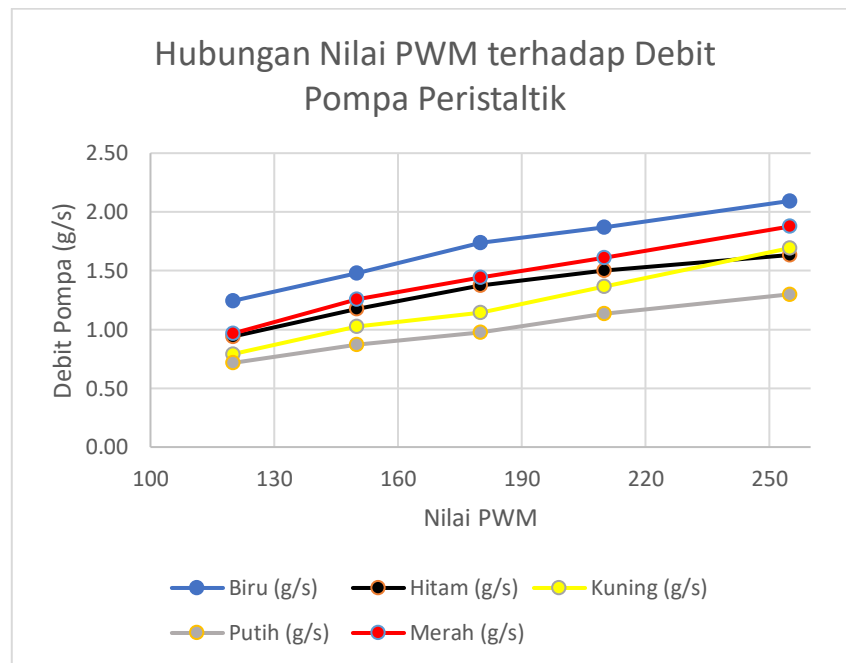
#### 4.4.1.1. Hasil Pengujian Debit Pompa

Hasil pengujian debit pompa pada tiap kondisi pengujian disajikan pada Tabel 4.6.

**Tabel 4. 6.** Hasil Pengujian debit pompa

| PWM | Biru<br>(g/s) | Hitam<br>(g/s) | Kuning<br>(g/s) | Putih<br>(g/s) | Merah<br>(g/s) |
|-----|---------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 120 | 1.24          | 0.94           | 0.79            | 0.72           | 0.97           |
| 150 | 1.48          | 1.18           | 1.02            | 0.87           | 1.25           |
| 180 | 1.74          | 1.37           | 1.15            | 0.97           | 1.44           |
| 210 | 1.87          | 1.50           | 1.36            | 1.13           | 1.61           |
| 255 | 2.09          | 1.63           | 1.69            | 1.30           | 1.88           |

Debit dinyatakan dalam satuan gram per detik karena sistem menggunakan metode *Gravimetric Dosing* berbasis pengukuran massa. Konversi ke mL/menit tidak digunakan karena setiap warna cat dapat memiliki densitas yang berbeda. Hubungan antara nilai PWM dan debit pompa yang dihasilkan ditampilkan dalam grafik pada Gambar 4.19.



**Gambar 4. 19.** Hubungan Nilai PWM terhadap Debit Pompa

Berdasarkan Gambar 4.19, debit aliran cat pada setiap pompa mengalami peningkatan seiring bertambahnya nilai PWM. Hal ini menunjukkan bahwa nilai PWM berpengaruh terhadap kecepatan putaran pompa peristaltik dan jumlah cat yang dikeluarkan. Pompa biru memiliki debit tertinggi pada sebagian besar nilai PWM, sedangkan pompa putih menghasilkan debit paling rendah. Perbedaan debit antar pompa dapat disebabkan oleh perbedaan karakteristik cat pada masing-masing warna.

#### **4.4.1.2. Analisis Pengaruh PWM terhadap Debit Pompa**

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan nilai PWM dari 120, 150, 180, 210, hingga 255 menyebabkan debit pompa semakin besar. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Rofdian dan Hartono (2018) yang menyatakan bahwa peningkatan nilai PWM meningkatkan *duty cycle* sehingga kecepatan putar motor DC juga meningkat. Dengan meningkatnya kecepatan putar motor, jumlah putaran roller pada pompa peristaltik per satuan waktu bertambah sehingga volume fluida yang dipindahkan setiap menit menjadi lebih besar.

Dari grafik hubungan nilai PWM terhadap debit pompa, seluruh pompa menunjukkan pola kenaikan debit yang relatif searah. Pompa biru menghasilkan debit tertinggi pada sebagian besar nilai PWM, yaitu mencapai 2,09 g/s pada PWM 255. Pompa merah juga menunjukkan debit yang cukup tinggi dengan nilai 1,88 g/s pada PWM 255, sedangkan pompa putih menghasilkan debit paling rendah dibandingkan pompa lainnya, yaitu 1,30 g/s pada PWM 255. Perbedaan debit antar pompa menunjukkan bahwa meskipun pompa menggunakan tipe dan nilai PWM yang sama, debit keluaran tidak selalu identik. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh karakteristik masing-masing motor pompa serta karakteristik fisik cat pada setiap warna.

Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa PWM 120 masih mampu menghasilkan aliran cat pada seluruh pompa. PWM 120 digunakan sebagai kondisi debit rendah dalam pengujian karakteristik pompa sekaligus sebagai nilai PWM tahap presisi pada implementasi *Two-stage Dosing*. Nilai tersebut dipilih karena merupakan PWM terendah yang masih mampu menghasilkan aliran cat secara konsisten pada seluruh pompa. Pada nilai PWM yang terlalu rendah, debit pompa menjadi lebih kecil sehingga

waktu pengisian dapat menjadi lebih lama. Oleh karena itu, nilai PWM 120 lebih tepat digunakan sebagai data pembanding, bukan sebagai parameter utama pengisian presisi.

Pada penerapan sistem, metode *Two-stage Dosing* menggunakan PWM 255 sebagai tahap cepat dan PWM 120 sebagai tahap presisi. PWM 255 digunakan ketika massa cat masih jauh dari target karena mampu menghasilkan debit terbesar, sehingga proses pengisian dapat berlangsung lebih cepat. Sementara itu, PWM 120 digunakan ketika massa cat sudah mendekati target. Pemilihan PWM 120 sebagai tahap presisi dilakukan karena nilai tersebut masih memberikan debit yang lebih rendah dibandingkan PWM 255, tetapi tetap cukup stabil untuk mengalirkan cat. Dengan demikian, proses pengisian tidak terlalu lambat, tetapi risiko kelebihan massa akibat sisa aliran setelah pompa dimatikan tetap dapat dikurangi.

#### 4.4.2. Pengujian Kestabilan Aliran Cat

Pengujian kestabilan debit pompa peristaltik dilakukan untuk mengetahui konsistensi keluaran cat pada nilai PWM yang sama. Pada pengujian ini, setiap pompa diuji sebanyak tiga kali pada dua kondisi PWM, yaitu PWM 120 dan PWM 255. PWM 120 digunakan untuk mewakili kondisi debit rendah, sedangkan PWM 255 digunakan untuk mewakili kondisi debit maksimum.

Parameter yang dianalisis meliputi rata-rata keluaran, nilai maksimum, nilai minimum, dan persentase rentang relatif. Persentase rentang relatif diperoleh dari perbandingan selisih nilai maksimum dan minimum terhadap nilai rata-rata hasil pengujian. Semakin kecil nilai RR, semakin kecil penyebaran hasil pengeluaran cat dan semakin konsisten kinerja pompa. Persentase rentang relatif hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.7.

**Tabel 4. 7.** Persentase Rentang Relatif

| Warna | Persentase Rentang     | Persentase Rentang     |
|-------|------------------------|------------------------|
|       | Relatif PWM 120<br>(%) | Relatif PWM 255<br>(%) |
| Biru  | 2.01                   | 1.72                   |
| Hitam | 1.28                   | 2.02                   |

|        |      |      |
|--------|------|------|
| Kuning | 2.65 | 0.53 |
| Putih  | 1.54 | 1.08 |
| Merah  | 3.00 | 2.08 |

Nilai rentang relatif setiap pompa disajikan pada Tabel 4.7. Berdasarkan hasil pengujian kestabilan debit pompa peristaltik, pengujian dilakukan pada dua nilai PWM, yaitu PWM 120 dan PWM 255. PWM 120 digunakan untuk mewakili kondisi debit rendah, sedangkan PWM 255 digunakan untuk mewakili kondisi debit maksimum. Setiap pompa diuji sebanyak tiga kali, kemudian dianalisis menggunakan persentase rentang relatif (Relative Range/RR), yaitu perbandingan antara selisih nilai maksimum dan minimum terhadap nilai rata-rata hasil pengujian. Semakin kecil nilai RR, semakin stabil keluaran pompa. Pada penelitian ini, sesuai dengan penjelasan pada Bab II, batas evaluasi internal sebesar 5% digunakan sebagai kriteria untuk menilai konsistensi keluaran pompa pada pengujian berulang, meskipun batas tersebut bukan merupakan standar baku khusus untuk pompa peristaltik.

Berdasarkan hasil pengujian pada PWM 120, seluruh pompa menghasilkan nilai RR di bawah batas evaluasi 5%. Pompa biru memiliki rata-rata keluaran sebesar 12,44 g dengan RR sebesar 2,01%, pompa hitam 9,40 g dengan RR 1,28%, pompa kuning 7,91 g dengan RR 2,65%, pompa putih 7,16 g dengan RR 1,54%, dan pompa merah 9,66 g dengan RR 3,00%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh pompa memiliki keluaran yang konsisten pada kondisi debit rendah.

Pada PWM 255, seluruh pompa juga menghasilkan nilai RR di bawah 5%. Pompa biru memiliki rata-rata keluaran sebesar 20,94 g dengan RR 1,72%, pompa hitam 16,34 g dengan RR 2,02%, pompa kuning 16,93 g dengan RR 0,53%, pompa putih 13,00 g dengan RR 1,08%, dan pompa merah 18,76 g dengan RR 2,08%. Dengan demikian, seluruh pompa juga menunjukkan konsistensi keluaran yang baik pada kondisi debit maksimum.

Jika dibandingkan, nilai RR pada PWM 120 berada pada rentang 1,28%–3,00%, sedangkan pada PWM 255 berada pada rentang 0,53%–2,08%. Seluruh nilai tersebut masih berada di bawah batas evaluasi 5%, sehingga pompa mampu menghasilkan

keluaran yang konsisten baik pada kondisi debit rendah maupun tinggi. Perbedaan nilai RR antar pompa diduga dipengaruhi oleh karakteristik masing-masing pompa, seperti elastisitas selang, tekanan roller, kondisi motor, hambatan aliran, serta karakteristik fisik cat.

Selain itu, peningkatan nilai PWM diikuti oleh peningkatan rata-rata massa cat yang dikeluarkan oleh seluruh pompa. Pompa biru meningkat dari 12,44 g menjadi 20,94 g, pompa hitam dari 9,40 g menjadi 16,34 g, pompa kuning dari 7,91 g menjadi 16,93 g, pompa putih dari 7,16 g menjadi 13,00 g, dan pompa merah dari 9,66 g menjadi 18,76 g. Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan PWM berpengaruh terhadap jumlah cat yang dikeluarkan pompa, meskipun fokus utama pengujian ini adalah mengevaluasi konsistensi keluaran, bukan besarnya debit.

Secara keseluruhan, seluruh pompa menunjukkan keluaran yang stabil pada PWM 120 maupun PWM 255 karena nilai RR masih berada di bawah batas evaluasi internal sebesar 5%. Konsistensi keluaran ini mendukung proses *Gravimetric Dosing*, karena fluktuasi keluaran yang kecil memudahkan sistem mengendalikan massa cat. Meskipun demikian, sistem pencampuran cat tidak hanya mengandalkan karakteristik debit pompa atau lama waktu pengoperasian, tetapi menggunakan umpan balik dari *load cell* sebagai acuan utama untuk menghentikan setiap pompa ketika massa target telah tercapai.

#### **4.4.3. Analisis Pengaruh PWM terhadap Jumlah Cat yang Dikeluarkan**

Berdasarkan hasil pengujian debit pompa yang ditampilkan pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.30, peningkatan nilai PWM menyebabkan peningkatan debit massa cat pada seluruh pompa peristaltik. Pada pompa biru, debit meningkat dari 1,24 g/s pada PWM 120 menjadi 2,09 g/s pada PWM 255. Pompa hitam mengalami peningkatan dari 0,94 g/s menjadi 1,63 g/s, pompa kuning dari 0,79 g/s menjadi 1,69 g/s, pompa putih dari 0,72 g/s menjadi 1,30 g/s, dan pompa merah dari 0,97 g/s menjadi 1,88 g/s. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar nilai PWM yang diberikan, semakin cepat massa cat bertambah dalam *mixing tank*.

Peningkatan debit terjadi karena nilai PWM yang lebih besar meningkatkan daya rata-rata yang diterima motor pompa. Kondisi tersebut menyebabkan motor dan roller

pompa berputar lebih cepat sehingga frekuensi penekanan selang meningkat. Akibatnya, jumlah cat yang dipindahkan dalam setiap satuan waktu menjadi lebih besar. Meskipun demikian, hubungan peningkatan PWM dan debit tidak menghasilkan nilai yang sama pada setiap pompa.

Perbedaan debit antar pompa terlihat meskipun seluruh pompa menggunakan jenis dan spesifikasi yang sama. Pada PWM 255, pompa biru menghasilkan debit tertinggi sebesar 2,09 g/s, sedangkan pompa putih menghasilkan debit terendah sebesar 1,30 g/s. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh karakteristik motor masing-masing pompa, tekanan roller terhadap selang, elastisitas selang, kondisi jalur aliran, serta hambatan mekanis pada pompa. Oleh karena itu, nilai debit setiap pompa tidak dapat dianggap sama dan perlu diuji secara terpisah.

Debit yang lebih besar pada PWM 255 memberikan keuntungan berupa waktu penakaran yang lebih singkat. Namun, penggunaan PWM 255 ketika massa sudah mendekati target dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya kelebihan massa karena cat masih mengalir selama respons perpindahan dan setelah pompa dimatikan. Sebaliknya, PWM 120 menghasilkan debit yang lebih rendah sehingga penambahan massa berlangsung lebih lambat dan lebih mudah dikendalikan ketika mendekati target.

Berdasarkan hasil pengujian, peningkatan nilai PWM terbukti meningkatkan debit massa cat yang dihasilkan oleh seluruh pompa peristaltik. Meskipun demikian, setiap pompa memiliki karakteristik debit yang berbeda sehingga nilai debit tidak dapat disamaratakan. Oleh karena itu, hasil pengujian debit ini menjadi dasar dalam penentuan parameter pengendalian pada sistem pencampuran cat otomatis, khususnya dalam penerapan metode PWM *Two-stage Dosing* dan *Gravimetric Dosing* untuk mencapai massa target secara akurat.

#### **4.5. Hasil Pengujian Metode *Sequential Control***

##### **4.5.1. Pengujian Urutan Kerja Pompa Berdasarkan Komposisi Warna**

Kondisi pengujian urutan kerja pompa ditunjukkan pada Gambar 4.20. sampai pada Gambar 4.25. sebagai berikut :



**Gambar 4. 20.** Proses selesai



**Gambar 4. 21.** Pompa M5 (Merah)



**Gambar 4. 22.** Pompa M4 (Putih)



**Gambar 4. 23.** Pompa M3 (Kuning)



**Gambar 4. 24.** Pompa M2 (Hitam)



**Gambar 4. 25.** Pompa M1 (Biru)

Dokumentasi selama pengujian pompa ditunjukkan pada Gambar 4.20 hingga Gambar 4.25. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi apakah implementasi *Sequential Control* mampu mengaktifkan pompa sesuai urutan komposisi warna yang telah diprogram. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi komposisi warna dengan mengamati urutan aktivasi setiap pompa selama proses dosing. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh pompa bekerja secara bergantian sesuai urutan yang ditentukan dan tidak ditemukan kondisi dua pompa aktif secara bersamaan. Hal tersebut menunjukkan bahwa implementasi *Sequential Control* mampu mengendalikan proses pengeluaran cat secara sistematis sehingga setiap pompa menyelesaikan proses dosing sebelum pompa berikutnya diaktifkan.

#### 4.6. Hasil Pengujian Metode *Gravimetric Dosing*

Pengujian gravimetric *Two-stage Dosing* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menakar cat berdasarkan massa aktual menggunakan dua tingkat PWM. PWM 255 digunakan pada tahap cepat, sedangkan PWM 120 digunakan pada tahap presisi. Perpindahan PWM ditentukan berdasarkan nilai  $\Delta m$  threshold masing-masing pompa, sedangkan penghentian pompa ditentukan berdasarkan nilai

kompensasi stop final. Kedua parameter tersebut diperoleh melalui pengujian karakteristik aliran pompa dan selanjutnya diterapkan pada program pengendalian dosing. Susunan alat pengujian gravimetric pada pompa peristaltik ditunjukkan pada Gambar 4.26



**Gambar 4. 26.** Setup Pengujian Gravimetric pada Pompa Peristaltik  
(Dokumentasi peneliti)

Berdasarkan Gambar 4.26, cat dialirkan oleh pompa peristaltik menuju *mixing tank* yang diletakkan padaudukan *load cell*. Perubahan massa pada *mixing tank* dibaca melalui modul HX711 dan diproses oleh arduino sebagai umpan balik untuk menentukan perpindahan PWM serta kondisi penghentian pompa..

#### **4.6.1. Pengujian Overshoot dan Sisa Aliran Pompa**

Pengujian *overshoot* dilakukan untuk mengetahui penambahan massa yang masih terjadi setelah pompa dimatikan. Fenomena tersebut terjadi karena masih terdapat cat pada bagian ujung selang dan ruang tekan pompa yang tetap keluar sesaat setelah sinyal PWM dihentikan. Pengujian dilakukan pada PWM 255 dan PWM 120 dengan target massa 50 g. Setelah pompa dimatikan, sistem menunggu selama 5 detik agar pembacaan massa stabil. Setiap kondisi diuji sebanyak tiga kali dan nilai rata-ratanya digunakan sebagai data *overshoot* awal.

Pengambilan data overshoot dan sisa aliran dilakukan dengan menjalankan masing-masing pompa menggunakan metode PWM *Two-stage Dosing*. Setiap pompa dioperasikan menuju massa target yang telah ditentukan, kemudian massa akhir yang terbaca pada *load cell* dicatat setelah pompa benar-benar berhenti. Selisih antara massa target dan massa akhir digunakan untuk menentukan nilai overshoot dan sisa aliran

pada setiap pompa. Pengujian dilakukan secara berulang selama 3 kali untuk memperoleh nilai yang konsisten sebelum dilakukan penentuan parameter kompensasi penghentian pompa (stop compensation). Rekapitulasi overshoot awal pompa pada PWM 255 dan PWM 120 disajikan pada Tabel 4.8.

**Tabel 4. 8.** Rekapitulasi *Overshoot* Awal Pompa pada PWM 255 dan PWM 120

| Pompa | Warna  | <i>Overshoot</i> Avg 255 | <i>Overshoot</i> Avg 120 |
|-------|--------|--------------------------|--------------------------|
|       |        | (g)                      | (g)                      |
| 1     | Biru   | 0.85                     | 0.53                     |
| 2     | Hitam  | 1.12                     | 0.75                     |
| 3     | Kuning | 1.72                     | 0.92                     |
| 4     | Putih  | 0.94                     | 0.59                     |
| 5     | Merah  | 0.83                     | 0.41                     |

Hasil pengujian overshoot pompa dirangkum pada Tabel 4.8. Nilai overshoot pada PWM 120 digunakan sebagai acuan awal dalam menentukan kompensasi penghentian pompa. Nilai tersebut belum langsung digunakan sebagai parameter final karena pengujian overshoot dilakukan pada satu kondisi PWM, sedangkan sistem final bekerja melalui urutan PWM 255 menuju PWM 120. Oleh karena itu, nilai kompensasi stop selanjutnya dievaluasi melalui pengujian satu siklus gravimetric *Two-stage Dosing* sebelum dimasukkan ke dalam program sebagai parameter final.

Berdasarkan Tabel 4.8, seluruh pompa mengalami *overshoot* setelah pompa dimatikan. Pada PWM 255, *overshoot* terbesar terdapat pada pompa kuning sebesar 1,72 g, sedangkan nilai terkecil terdapat pada pompa merah sebesar 0,83 g. Pada PWM 120, *overshoot* terbesar juga terdapat pada pompa kuning sebesar 0,92 g, sedangkan nilai terkecil terdapat pada pompa merah sebesar 0,41 g.

Nilai *overshoot* pada PWM 120 lebih kecil dibandingkan PWM 255 untuk seluruh pompa. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan PWM yang lebih rendah dapat mengurangi massa tambahan setelah pompa dimatikan. Oleh karena itu, PWM 120 digunakan sebagai tahap presisi ketika massa mendekati target. Data *overshoot*

PWM 120 selanjutnya digunakan sebagai parameter awal penghentian pompa dan dievaluasi kembali melalui pengujian satu siklus *Two-stage Dosing*.

#### 4.6.2. Penentuan Waktu Delay dan $\Delta m_{\text{threshold}}$

Pengujian waktu delay dilakukan untuk mengetahui keterlambatan respons sistem ketika perintah PWM pompa diubah dari 255 menjadi 120. Pada pengujian waktu delay, nilai 25 g digunakan sebagai titik pemicu pengukuran dan bukan sebagai batas switch pada sistem final. Pompa terlebih dahulu dijalankan pada PWM 255. Ketika massa yang terbaca mencapai 25 g, perintah perubahan PWM menjadi 120 diberikan dan waktu mulai dicatat. Selisih waktu antara pemberian perintah dan terdeteksinya perubahan laju penambahan massa dinyatakan sebagai waktu delay. Nilai waktu delay tersebut selanjutnya digunakan bersama debit PWM 255 untuk menghitung  $\Delta m_{\text{threshold}}$  dan menentukan batas switch pada target dosing 50 g. Sistem kemudian mendeteksi perubahan laju penambahan massa setelah PWM diturunkan menjadi 120. Selisih waktu antara pemberian perintah dan respons yang terdeteksi dicatat sebagai waktu delay. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap pompa menggunakan kondisi selang, jenis cat, tegangan sumber, pembacaan *load cell*, dan filter data yang sama. Hasil penentuan waktu delay dan nilai  $\Delta m_{\text{threshold}}$  disajikan pada Tabel 4.9.

**Tabel 4. 9.** Penentuan Waktu Delay dan  $\Delta m_{\text{threshold}}$

| Warna  | Debit PWM<br>255 (g/s) | Rata-rata<br>$t_{\text{delay}}$ (s) | $\Delta m_{\text{threshold}}$<br>(g) | Batas<br>switch 50<br>g (g) |
|--------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Biru   | 2,09                   | 0,900                               | 1,881                                | 48,119                      |
| Hitam  | 1,63                   | 1,333                               | 2,173                                | 47,827                      |
| Kuning | 1,69                   | 1,300                               | 2,197                                | 47,                         |
| Putih  | 1,30                   | 1,300                               | 1,690                                | 48,310                      |
| Merah  | 1,88                   | 1,200                               | 2,256                                | 47,744                      |

Berdasarkan Tabel 4.9, waktu delay rata-rata setiap pompa berada pada rentang 0,900–1,333 detik. Perbedaan waktu delay menyebabkan nilai  $\Delta m_{\text{threshold}}$  setiap pompa berbeda. Nilai  $\Delta m_{\text{threshold}}$  terbesar diperoleh pada pompa merah sebesar

2,256 g, sedangkan nilai terkecil diperoleh pada pompa putih sebesar 1,690 g. Nilai tersebut digunakan untuk menentukan titik perpindahan dari PWM 255 menuju PWM 120 sebelum massa mencapai target. Nilai  $\Delta m_{\text{threshold}}$  terbesar diperoleh pada pompa merah sebesar 2,256 g, sedangkan nilai terkecil terdapat pada pompa putih sebesar 1,690 g. Nilai tersebut digunakan untuk menentukan batas perpindahan dari PWM 255 menuju PWM 120. Dengan demikian, setiap pompa memiliki titik perpindahan yang berbeda sesuai karakteristik debit dan waktu responsnya.

Hasil  $\Delta m_{\text{threshold}}$  pada Tabel 4.9 selanjutnya dimasukkan ke dalam array  $\Delta m_{\text{threshold}}$  pada program dengan urutan pompa biru, hitam, kuning, putih, dan merah. Program memanggil nilai tersebut berdasarkan indeks pompa yang sedang aktif untuk menentukan batas *SwitchTahap*. Pada target 50 g, batas switch berada pada rentang 47,744–48,310 g. Setelah massa mencapai batas tersebut, sistem menurunkan PWM pompa dari 255 menjadi 120 untuk memperlambat penambahan massa sebelum pompa dihentikan.

#### 4.6.3. Implementasi Parameter Final *Two-stage Dosing*

Parameter final *Two-stage Dosing* ditetapkan berdasarkan hasil pengujian debit pompa, waktu delay, pengujian overshoot, serta validasi *Gravimetric Dosing*. Nilai  $\Delta m_{\text{threshold}}$  digunakan sebagai batas perpindahan dari PWM 255 menuju PWM 120, sedangkan stop compensation digunakan sebagai batas penghentian pompa sebelum massa target tercapai untuk mengompensasi sisa aliran cat yang masih keluar setelah pompa dimatikan.

Nilai  $\Delta m_{\text{threshold}}$  diperoleh dari hasil karakterisasi debit pompa, waktu delay, dan pengujian overshoot. Selanjutnya, parameter tersebut diimplementasikan pada sistem dan dilakukan pengujian validasi *Gravimetric Dosing*. Berdasarkan hasil validasi, masih ditemukan deviasi massa akhir pada beberapa pompa sehingga dilakukan penyesuaian (*tuning*) terhadap nilai stop compensation. Proses ini bertujuan memperoleh parameter yang menghasilkan akurasi penakaran terbaik. Oleh karena itu, nilai stop compensation yang digunakan pada implementasi akhir tidak selalu sama dengan nilai overshoot hasil pengujian awal. Parameter final yang digunakan pada metode two-stage dosing dirangkum pada Tabel 4.10.

**Tabel 4. 10.** Parameter Final *Two-stage Dosing*

| Warna  | $\Delta m_{\text{threshold}}$<br>(g) | Batas<br>switch 50<br>g (g) | Kompensasi<br>stop final<br>(g) | Batas<br>stop final<br>50 g (g) |
|--------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Biru   | 1,881                                | 48,119                      | 1,134                           | 48,866                          |
| Hitam  | 2,173                                | 47,827                      | 0,750                           | 49,250                          |
| Kuning | 2,197                                | 47,803                      | 0,920                           | 49,080                          |
| Putih  | 1,690                                | 48,310                      | 0,590                           | 49,410                          |
| Merah  | 2,256                                | 47,744                      | 0,410                           | 49,590                          |

Berdasarkan Tabel 4.10, setiap pompa menggunakan parameter perpindahan dan penghentian yang berbeda. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan satu nilai parameter untuk seluruh pompa kurang sesuai karena setiap pompa memiliki debit, waktu respons, dan sisa aliran yang berbeda.

Dalam implementasinya, pompa bekerja pada PWM 255 ketika massa aktual masih berada di bawah batas switch. Setelah batas switch tercapai, PWM diturunkan menjadi 120. Pompa kemudian dimatikan ketika massa aktual mencapai batas stop final. Batas switch dan batas stop pada Tabel 4.11 merupakan contoh untuk target komponen 50 g dengan kondisi massa awal 0 g.

Pada proses pencampuran beberapa warna, tare hanya dilakukan satu kali ketika *mixing tank* masih kosong. Sistem tidak mengulang tare pada setiap pergantian pompa. Massa aktual terakhir digunakan sebagai titik awal untuk menentukan target tahap berikutnya. Sebagai contoh, apabila massa aktual setelah proses pertama sebesar 251 g dan komponen berikutnya memiliki target 250 g, target tahap berikutnya menjadi 501 g. Dengan metode tersebut, kelebihan kecil pada tahap sebelumnya tidak mengurangi jumlah komponen warna berikutnya dan total massa dalam *mixing tank* tetap dapat dipantau.

#### 4.6.4. Validasi Akurasi dan Konsistensi Gravimetric *Two-stage Dosing*

Validasi gravimetric *Two-stage Dosing* dilakukan setelah seluruh parameter perpindahan dan penghentian ditetapkan. Pengujian bertujuan untuk mengetahui

apakah penerapan PWM 255 pada tahap cepat, PWM 120 pada tahap presisi, serta kompensasi stop final mampu menghasilkan massa yang sesuai dengan target. Setiap pompa diuji sebanyak tiga kali pada target komponen 50 g. Setelah pompa dimatikan, sistem menunggu selama 5 detik sebelum massa akhir dicatat. Hasil validasi massa pada target 50 g disajikan pada Tabel 4.11.

**Tabel 4. 11.** Tabel Validasi massa 50g

| <b>Pompa</b> | <b>Percobaan</b> | <b>Target<br/>(g)</b> | <b>Massa aktual<br/>(g)</b> | <b>Error<br/>(g)</b> | <b>Error<br/>(%)</b> |
|--------------|------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| Biru         | 1                | 50,000                | 50,060                      | 0,060                | 0,120                |
| Biru         | 2                | 50,000                | 50,123                      | 0,123                | 0,246                |
| Biru         | 3                | 50,000                | 50,052                      | 0,052                | 0,104                |
| Hitam        | 1                | 50,000                | 50,186                      | 0,186                | 0,372                |
| Hitam        | 2                | 50,000                | 50,119                      | 0,119                | 0,238                |
| Hitam        | 3                | 50,000                | 50,004                      | 0,004                | 0,008                |
| Kuning       | 1                | 50,000                | 50,066                      | 0,066                | 0,132                |
| Kuning       | 2                | 50,000                | 50,071                      | 0,071                | 0,142                |
| Kuning       | 3                | 50,000                | 50,189                      | 0,189                | 0,378                |
| Putih        | 1                | 50,000                | 50,288                      | 0,288                | 0,576                |
| Putih        | 2                | 50,000                | 49,990                      | 0,010                | 0,020                |
| Putih        | 3                | 50,000                | 50,129                      | 0,129                | 0,258                |
| Merah        | 1                | 50,000                | 50,121                      | 0,121                | 0,242                |
| Merah        | 2                | 50,000                | 50,116                      | 0,116                | 0,232                |
| Merah        | 3                | 50,000                | 50,180                      | 0,180                | 0,360                |

Berdasarkan Tabel 4.11, seluruh hasil pengujian, Error terbesar terdapat pada percobaan pertama pompa putih sebesar 0,576%, sedangkan error terkecil terdapat pada percobaan ketiga pompa hitam sebesar 0,008%.

Pompa putih pada percobaan kedua menghasilkan massa 49,990 g atau lebih rendah 0,010 g dari target. Meskipun demikian, nilai error absolutnya hanya sebesar 0,020%, sehingga hasil tersebut tetap berada dalam batas toleransi. Hasil validasi massa gravimetric two-stage dosing pada target 50 g disajikan pada Tabel 4.12.

**Tabel 4. 12.** Hasil Validasi Massa Gravimetric *Two-stage Dosing* pada Target 50 g

| Warna  | Massa            | Error            | SD (g) | CV (%) | RR (%) |
|--------|------------------|------------------|--------|--------|--------|
|        | rata-rata<br>(g) | rata-rata<br>(%) |        |        |        |
| Biru   | 50,078           | 0,157            | 0,039  | 0,078  | 0,142  |
| Hitam  | 50,103           | 0,206            | 0,092  | 0,184  | 0,363  |
| Kuning | 50,109           | 0,217            | 0,070  | 0,139  | 0,245  |
| Putih  | 50,136           | 0,285            | 0,149  | 0,297  | 0,594  |
| Merah  | 50,139           | 0,278            | 0,036  | 0,071  | 0,128  |

Hasil validasi Gravimetric Two-stage Dosing disajikan pada Tabel 4.12. Hasil rekapitulasi menunjukkan bahwa massa rata-rata seluruh pompa berada sangat dekat dengan target 50 g. Error rata-rata terbesar terdapat pada pompa putih sebesar 0,285%, sedangkan error rata-rata terkecil terdapat pada pompa biru sebesar 0,157%.

Berdasarkan hasil pengujian, nilai error yang diperoleh pada setiap target massa relatif kecil. Hasil ini menunjukkan bahwa metode two-stage *Gravimetric Dosing* mampu mengendalikan proses penambahan massa hingga mendekati nilai target. Menurut Sahay dkk. (2013), sistem closed-loop gravimetric control memanfaatkan pengukuran massa secara *realtime* sebagai umpan balik (*feedback*) untuk meningkatkan akurasi dan presisi proses dosing. Dengan adanya umpan balik tersebut, sistem dapat mengoreksi proses penambahan material hingga massa yang diinginkan tercapai dengan penyimpangan yang minimal.

Pada penelitian ini, prinsip tersebut diterapkan melalui metode *Two-stage Dosing*, yaitu tahap pengisian cepat menggunakan PWM tinggi dan tahap presisi menggunakan PWM yang lebih rendah ketika massa mendekati target. Strategi ini mengurangi laju penambahan massa pada tahap akhir sehingga potensi overshoot dapat ditekan. Oleh karena itu, nilai error yang relatif kecil pada seluruh target massa menunjukkan bahwa implementasi metode two-stage *Gravimetric Dosing* telah bekerja dengan baik dalam meningkatkan ketepatan proses pencampuran cat. Prinsip ini sejalan dengan konsep

closed-loop *Gravimetric Dosing*, yaitu penggunaan pengukuran massa sebagai umpan balik untuk mencapai target dosis secara akurat

Nilai Koefisien Variasi (CV) seluruh pompa berada pada rentang 0,071–0,297%, sedangkan persentase rentang relatif berada pada rentang 0,128–0,594%. Nilai CV yang sangat rendah menunjukkan bahwa variasi hasil penakaran pada setiap pengulangan relatif kecil. Menurut Harmita (2004), nilai CV atau Relative Standard Deviation (RSD) digunakan sebagai indikator presisi (*repeatability*) suatu metode, di mana semakin kecil nilai CV maka semakin baik tingkat keterulangan hasil pengukuran. Penelitian pada Jurnal Cendikia Jenius (2025) juga menyatakan bahwa nilai  $CV \leq 5\%$  memenuhi kriteria presisi yang baik. Oleh karena itu, hasil penakaran pada penelitian ini menunjukkan konsistensi yang sangat baik pada tiga kali pengulangan. Oleh karena itu, hasil penakaran pada penelitian ini tidak hanya mampu mencapai target massa, tetapi juga menunjukkan konsistensi yang sangat baik pada tiga kali pengulangan. Hasil pengujian waktu tahap presisi dan waktu total proses dosing disajikan pada Tabel 4.13.

**Tabel 4. 13.** Pengujian waktu tahap preisi dan waktu total

| <b>Warna</b> | <b>Massa<br/>switch<br/>rata-rata<br/>(g)</b> | <b>Massa<br/>OFF<br/>rata-<br/>rata (g)</b> | <b>Sisa<br/>aliran<br/>rata-<br/>rata (g)</b> | <b>Waktu<br/>tahap<br/>presisi rata-<br/>rata (s)</b> | <b>Waktu<br/>total<br/>rata-rata<br/>(s)</b> |
|--------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Biru         | 48,132                                        | 48,919                                      | 1,136                                         | 0,427                                                 | 26,139                                       |
| Hitam        | 47,894                                        | 49,306                                      | 0,810                                         | 0,977                                                 | 31,664                                       |
| Kuning       | 47,877                                        | 49,134                                      | 0,941                                         | 0,764                                                 | 28,555                                       |
| Putih        | 48,358                                        | 49,449                                      | 0,679                                         | 1,190                                                 | 38,257                                       |
| Merah        | 47,745                                        | 49,555                                      | 0,507                                         | 2,351                                                 | 32,750                                       |

Berdasarkan Tabel 4.13, perpindahan PWM berhasil dilakukan mendekati batas switch masing-masing pompa. Rata-rata waktu tahap presisi tercepat terdapat pada pompa biru sebesar 0,427 detik, sedangkan waktu terlama terdapat pompa merah

sebesar 2,351 detik,. Perbedaan waktu tersebut dipengaruhi oleh rentang antara batas switch dan batas stop serta karakteristik debit PWM 120 setiap pompa.

Waktu total dosing tercepat terdapat pada pompa biru sebesar 26,139 detik, sedangkan waktu terlama terdapat pada pompa putih sebesar 38,257 detik. Perbedaan waktu total menunjukkan PWM 150 lebih tepat digunakan sebagai data pembandingan, bukan sebagai parameter utama pengisian presisi. bahwa setiap pompa memiliki kemampuan pengeluaran cat yang berbeda meskipun menggunakan nilai PWM yang sama. Namun, perbedaan waktu tersebut tidak mengurangi akurasi massa karena sistem menggunakan pembacaan *load cell* sebagai umpan balik utama.

#### 4.7. Hasil Pengujian Sistem Pengaduk

##### 4.7.1. Pengujian Waktu Pengadukan

Pengujian waktu mixing cat dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem pengaduk dalam mencampurkan cat dengan variasi massa yang berbeda. Variasi massa cat yang digunakan pada pengujian ini adalah 250 gram, 500 gram, 750 gram, 1000 gram, dan 1250 gram. Pengujian dilakukan dengan mengamati kondisi cat sebelum mixing, mencatat waktu yang dibutuhkan sampai warna tercampur merata, serta mendokumentasikan kondisi cat setelah proses mixing selesai.

**Tabel 4. 14.** Hasil pengujian waktu mixing dengan variasi massa

| No | Massa Cat (g) | Kondisi Sebelum Mixing         | Waktu Mixing (s) | Kondisi Setelah Mixing |
|----|---------------|--------------------------------|------------------|------------------------|
| 1  | 250           | masih terlihat perbedaan warna | 23               | Warna tercampur merata |
| 2  | 500           | masih terlihat perbedaan warna | 50               | Warna tercampur merata |
| 3  | 750           | masih terlihat perbedaan warna | 76               | Warna tercampur merata |
| 4  | 1000          | masih terlihat perbedaan warna | 102              | Warna tercampur merata |

|   |      |                                |     |                        |
|---|------|--------------------------------|-----|------------------------|
| 5 | 1250 | masih terlihat perbedaan warna | 125 | Warna tercampur merata |
|---|------|--------------------------------|-----|------------------------|

Tabel 4.14 menunjukkan hasil pengujian waktu mixing cat pada setiap variasi massa. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh sampel cat pada kondisi awal masih menunjukkan adanya perbedaan warna. Setelah dilakukan proses mixing, seluruh sampel menunjukkan kondisi warna yang tercampur merata. Selain data waktu mixing, pengujian juga didukung dengan dokumentasi visual. Dokumentasi ini digunakan untuk memperlihatkan kondisi cat sebelum proses mixing, waktu yang terbaca pada timer, serta kondisi cat setelah proses mixing selesai. Dengan adanya dokumentasi tersebut, hasil pengujian tidak hanya ditunjukkan melalui data angka, tetapi juga diperkuat dengan bukti visual bahwa cat telah tercampur merata. Dokumentasi hasil pengujian waktu mixing disajikan pada Tabel 4.15. Kondisi cat sebelum, sesudah dan waktu proses mixing pada pengujian 250 - 1250 gram ditunjukkan pada Gambar 4.27 sampai pada Gambar 4.41. Sebagai berikut :

**Tabel 4. 15.** Dokumentasi waktu mixing

| No | Massa Cat (g) | Gambar Sebelum Mixing                                                               | Gambar Timer                                                                         | Gambar Setelah Mixing                                                                 |
|----|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 250           |  |  |  |
|    |               | <b>Gambar 4. 27.</b><br>Sebelum Mixing 250gr                                        | <b>Gambar 4. 28.</b><br>Waktu Mixing 250                                             | <b>Gambar 4. 29.</b> Setelah mixing 250                                               |

---

2      500



**Gambar 4. 30.**  
Sebelum Mixing 500



**Gambar 4. 31.**  
Waktu Mixing  
500

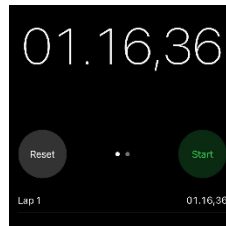


**Gambar 4. 32.** Setelah  
Mixing 500

3      750



**Gambar 4. 33.**  
Sebelum Mixing 750



**Gambar 4. 34.**  
Waktu Mixing  
750



**Gambar 4. 35.** Setelah  
Mixing 750

4      1000



**Gambar 4. 36.**  
Sebelum Mixing 1000



**Gambar 4. 37.**  
Waktu Mixing  
1000



**Gambar 4. 38.** Setelah  
Mixing 1000

5      1250



**Gambar 4. 39.**  
Sebelum Mixing 1250



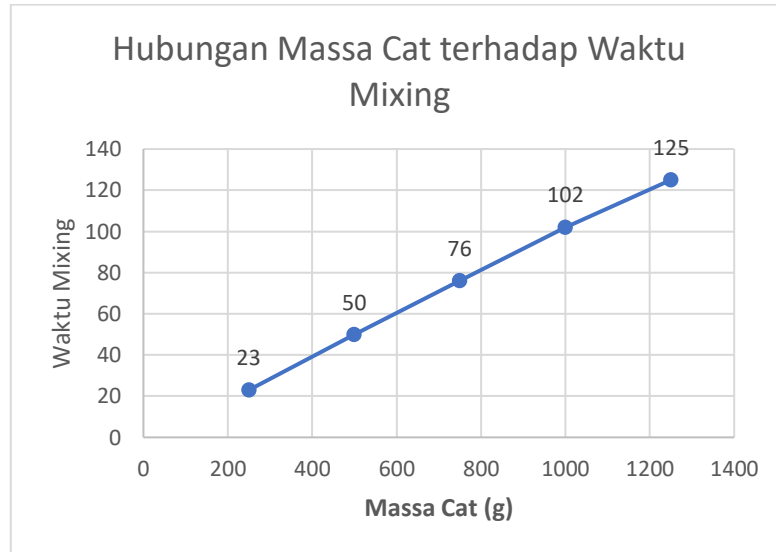
**Gambar 4. 40.**  
Waktu Mixing  
1250



**Gambar 4. 41.** Setelah  
Mixing 1250

---

Dibawah ini merupakan Grafik hubungan massa cat terhadap waktu mixing. Hubungan antara massa cat dan waktu mixing yang dibutuhkan ditampilkan dalam grafik pada Gambar 4.42.



**Gambar 4. 42.** Grafik hubungan massa cat terhadap waktu mixing

Gambar 4.42. menunjukkan hubungan antara massa cat dan waktu mixing pada proses pengadukan. Berdasarkan grafik tersebut, waktu mixing cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya massa cat, yaitu dari 23 detik pada massa 250 gram menjadi 125 detik pada massa 1250 gram. Kecenderungan ini menunjukkan bahwa semakin besar massa cat yang diaduk, semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi campuran yang merata.

#### **4.7.2. Analisis Kinerja Motor Pengaduk terhadap Hasil Campuran**

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 4.47, terlihat bahwa semakin besar massa cat yang diaduk, maka waktu mixing yang dibutuhkan juga semakin meningkat. Pada massa cat 250 g, waktu mixing yang dibutuhkan sebesar 23 detik. Ketika massa cat dinaikkan menjadi 500 g, waktu mixing meningkat menjadi 50 detik. Selanjutnya, pada massa 750 g, waktu mixing menjadi 76 detik, pada massa 1000 g menjadi 102 detik, dan pada massa 1250 g membutuhkan waktu 125 detik. Kenaikan waktu tersebut menunjukkan bahwa beban pengadukan bertambah seiring dengan meningkatnya jumlah cat di dalam wadah mixing.

Peningkatan waktu *mixing* terjadi karena volume cat yang lebih besar menyebabkan hambatan fluida terhadap putaran impeller semakin tinggi. Semakin banyak massa cat yang berada di dalam wadah, semakin besar pula energi yang dibutuhkan impeller untuk menghasilkan aliran dan menyebarkan warna secara merata. Selain itu, cat memiliki karakteristik fluida yang cukup kental sehingga proses pencampuran tidak berlangsung secara instan. Pada massa cat yang lebih besar, impeller membutuhkan waktu lebih lama untuk menggerakkan seluruh bagian cat agar tercampur secara homogen. Menurut Aubin, Fletcher, dan Xuereb (2007), waktu pencampuran (*mixing time*) dipengaruhi oleh sifat fluida, terutama viskositas, serta geometri impeller dan pola aliran yang terbentuk di dalam tangki. Oleh karena itu, semakin besar volume fluida yang diaduk, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi homogen juga cenderung meningkat.

Dari grafik tersebut, hubungan antara massa cat dan waktu mixing menunjukkan kecenderungan yang hampir linier. Yang mana, kenaikan massa cat berbanding lurus dengan peningkatan waktu pencampuran. Berdasarkan data pengujian, setiap kenaikan massa cat menyebabkan waktu mixing bertambah secara bertahap. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengaduk bekerja secara konsisten, karena waktu pencampuran meningkat mengikuti beban cat yang diberikan.

Pada pengujian ini motor pengaduk yang digunakan memiliki spesifikasi torsi sebesar 5 N.m. Apabila dikonversi ke satuan kg.cm, maka menjadi 50,99 kg.cm karena  $1 \text{ N.m} = 10,197 \text{ kg.cm}$ .

Berdasarkan perhitungan kebutuhan torsi yang telah dilakukan sebelumnya, torsi desain akhir yang dibutuhkan untuk sistem pengaduk adalah sekitar 23,17 kg.cm. Dengan demikian, motor yang digunakan memiliki kemampuan torsi sekitar 50,99 kg.cm, sehingga masih lebih besar daripada kebutuhan torsi hasil perhitungan. Selisih torsi tersebut menunjukkan bahwa motor masih mampu digunakan untuk proses pengadukan cat pada beban pengujian.

Namun, meskipun torsi motor masih mencukupi, waktu mixing tetap meningkat seiring bertambahnya massa cat. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan waktu mixing bukan hanya dipengaruhi oleh kemampuan torsi motor, tetapi juga oleh jumlah

massa cat, viskositas cat, bentuk impeller, diameter wadah, dan distribusi aliran di dalam mixing tank. Hal tersebut sejalan dengan pendapat Aubin, Fletcher, dan Xuereb (2007) yang menyatakan bahwa waktu pencampuran merupakan hasil interaksi antara karakteristik fluida, geometri sistem pengadukan, dan kondisi operasi, sehingga peningkatan volume fluida akan menyebabkan waktu pencampuran menjadi lebih lama. Pada massa cat 1250 g, waktu mixing mencapai 125 detik, sehingga massa cat yang lebih besar membutuhkan waktu pengadukan lebih lama agar hasil pencampuran dapat terlihat merata secara visual.

#### 4.8. Hasil Pengujian Komunikasi Raspberry Pi Dan Arduino

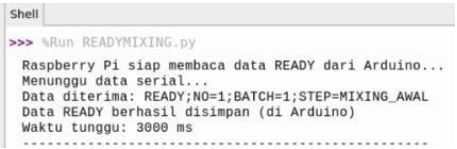
##### 4.8.1. Pengujian Pengiriman Data *READY*

Pengujian pertama dilakukan untuk melihat keberhasilan arduino dalam mengirimkan status *READY* ke raspberry Pi. Dalam sistem sebenarnya, status ini menunjukkan bahwa proses mixing awal atau mixing koreksi telah selesai, sehingga raspberry Pi dapat melanjutkan proses pembacaan warna. Pada bagian ini, arduino bertindak sebagai pengirim, sedangkan raspberry Pi bertindak sebagai penerima data.

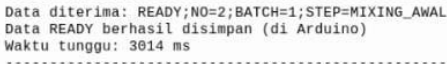
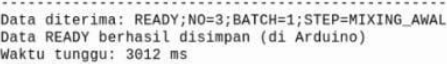
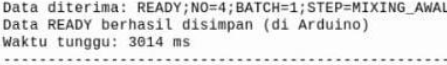
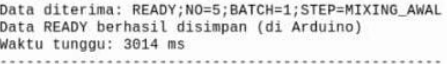
Hasil pengujian pengiriman data *READY* dari Arduino ke raspberry Pi disajikan pada Tabel 4.17. pada percobaan pertama sampai ke lima ditunjukkan pada Gambar 4.43 sampai pada Gambar 4.47. Sebagai berikut :

**Tabel 4. 16.** Pengujian Pengiriman Data *READY* dari arduino ke raspberry Pi

| No | Dokumentasi Data Serial<br>Diterima Raspberry Pi | Tahap<br>Proses | Waktu                        | Status |
|----|--------------------------------------------------|-----------------|------------------------------|--------|
|    |                                                  |                 | Tunggu<br>Penerimaan<br>(ms) |        |

|   |                                                                                     |                                                               |      |          |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------|----------|
| 1 |  | <i>mixing</i><br><br>awal<br><br>selesai<br>( <i>READY</i> ;) | 3000 | Berhasil |
|   |                                                                                     |                                                               |      |          |

**Gambar 4. 43.** Data serial  
“*READY*” di terima percobaan 1

|   |                                                                                                                                                             |                             |      |          |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------|----------|
| 2 |  <p><b>Gambar 4. 44.</b> Data serial<br/>“READY” di terima percobaan 2</p> | mixing                      | 3014 | Berhasil |
|   |                                                                                                                                                             | awal<br>selesai<br>(READY;) |      |          |
| 3 |  <p><b>Gambar 4. 45.</b> Data serial<br/>“READY” di terima percobaan 3</p> | mixing                      | 3012 | Berhasil |
|   |                                                                                                                                                             | awal<br>selesai<br>(READY;) |      |          |
| 4 |  <p><b>Gambar 4. 46.</b> Data serial<br/>“READY” di terima percobaan 4</p> | mixing                      | 3014 | Berhasil |
|   |                                                                                                                                                             | awal<br>selesai<br>(READY;) |      |          |
| 5 |  <p><b>Gambar 4. 47.</b> Data serial<br/>“READY” di terima percobaan 5</p> | mixing                      | 3014 | Berhasil |
|   |                                                                                                                                                             | awal<br>selesai<br>(READY;) |      |          |

Rekapitulasi pengujian pengiriman data READY disajikan pada Tabel 4.16. Berdasarkan hasil pengujian, data *READY* berhasil diterima oleh raspberry Pi pada lima kali percobaan. Waktu tunggu penerimaan data berada pada rentang 3000 ms sampai 3014 ms, dengan seluruh percobaan berstatus berhasil. Data yang diterima raspberry Pi menunjukkan bahwa arduino mampu mengirimkan pesan status proses secara konsisten melalui USB Serial.

#### 4.8.2. Pengujian Penerimaan dan Eksekusi Data KOREKSI

Pengujian kedua dilakukan untuk memastikan proses pengiriman data KOREKSI dari raspberry Pi, penerimaan data oleh Arduino, serta eksekusi data tersebut pada sistem pencampuran dapat berjalan dengan baik. Data KOREKSI dikirim ketika hasil analisis HSV menunjukkan nilai *error* melebihi batas toleransi sehingga diperlukan

proses penambahan massa cat pada warna tertentu Pada alur sistem, data KOREKSI dikirim ketika hasil analisis warna menunjukkan nilai error lebih dari 10%.

Data koreksi yang digunakan terdiri dari lima error, yaitu 16,40%, 17,10%, 15,85%, 18,20%, dan 16,95%. Seluruh nilai error tersebut berada di atas batas 10%, sehingga statusnya dikategorikan sebagai kondisi yang memerlukan koreksi. Nilai koreksi yang dikirim juga berbeda pada setiap percobaan, yaitu koreksi merah 2,50 g, kuning 1,80 g, biru 1,25 g, putih 3,00 g, dan hitam 1,60 g.

Data penerimaan warna koreksi hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.17. pada percobaan pertama sampai ke lima ditunjukkan pada Gambar 4.48 sampai pada Gambar 4.52. Sebagai berikut :

**Tabel 4. 17.** Data Penerimaan Warna koreksi

| NO | Error<br>Warna<br>(%) | Koreksi<br>Merah<br>(g) | Koreksi<br>Kuning<br>(g) | Koreksi<br>Biru (g) | Koreksi<br>Putih<br>(g) | Koreksi<br>Hitam<br>(g) |
|----|-----------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1  | 16.40                 | 2.50                    | 0.00                     | 0.00                | 0.00                    | 0.00                    |
| 2  | 17.10                 | 0.00                    | 1.80                     | 0.00                | 0.00                    | 0.00                    |
| 3  | 15.85                 | 0.00                    | 0.00                     | 1.25                | 0.00                    | 0.00                    |
| 4  | 18.20                 | 0.00                    | 0.00                     | 0.00                | 3.00                    | 0.00                    |
| 5  | 16.95                 | 0.00                    | 0.00                     | 0.00                | 0.00                    | 1.60                    |

Hasil pengujian penerimaan data KOREKSI dari raspberry Pi pada Arduino disajikan pada Tabel 4.18.

**Tabel 4. 18.** Pengujian Penerimaan Data KOREKSI dari raspberry Pi pada arduino

| NO | Error<br>Warna<br>(%) | Waktu<br>Pengiriman<br>(ms) | Dokumentasi |
|----|-----------------------|-----------------------------|-------------|
|----|-----------------------|-----------------------------|-------------|

---

1      16.40      3.0033

```
>>> %Run DATAKOREKSI.py
Pengujian pengiriman data koreksi dimulai...
File hasil: pengujian_pengiriman_data_koreksi.csv
-----
Data dikirim: KOREKSI;NO=1;ERROR=6.40;MERAH=2.50;KUNING=0.00;BIRU=0.00;PUTIH=0.00;HITAM=0.00
Waktu pengiriman: 3.0033 ms
```

**Gambar 4. 48.** Penerimaan Data koreksi percobaan 1

2      17.10      3.0602

```
-----
Data dikirim: KOREKSI;NO=2;ERROR=7.10;MERAH=0.00;KUNING=1.00;BIRU=0.00;PUTIH=0.00;HITAM=0.00
Waktu pengiriman: 3.0602 ms
```

**Gambar 4. 49.** Penerimaan Data koreksi percobaan 2

3      15.85      3.0027

```
-----
Data dikirim: KOREKSI;NO=3;ERROR=5.85;MERAH=0.00;KUNING=0.00;BIRU=1.25;PUTIH=0.00;HITAM=0.00
Waktu pengiriman: 3.0027 ms
```

**Gambar 4. 50.** Penerimaan Data koreksi percobaan 3

4      18.20      3.3121

```
-----
Data dikirim: KOREKSI;NO=4;ERROR=8.20;MERAH=0.00;KUNING=0.00;BIRU=0.00;PUTIH=3.00;HITAM=0.00
Waktu pengiriman: 3.3121 ms
```

**Gambar 4. 51.** Penerimaan Data koreksi percobaan 4

5      16.95      3.0802

```
-----
Data dikirim: KOREKSI;NO=5;ERROR=6.95;MERAH=0.00;KUNING=0.00;BIRU=0.00;PUTIH=0.00;HITAM=1.00
Waktu pengiriman: 3.0802 ms
```

**Gambar 4. 52.** Penerimaan Data koreksi percobaan 5

---

Data koreksi warna yang diterima sistem ditampilkan pada Tabel 4.17. Setelah proses mixing selesai, arduino mengirimkan pesan *READY* kepada raspberry Pi sebagai tanda bahwa campuran telah siap dianalisis. raspberry Pi kemudian mengambil citra warna dan membandingkan nilai HSV hasil pencampuran dengan nilai HSV target. Apabila nilai error HSV lebih dari 10%, warna dinyatakan belum sesuai sehingga raspberry Pi menentukan warna dasar yang perlu ditambahkan beserta massa koreksinya dalam satuan gram.

Hasil perhitungan tersebut kemudian dikirimkan kepada arduino melalui komunikasi USB Serial menggunakan pesan KOREKSI. Pesan yang dikirim memuat nilai error HSV dan massa koreksi untuk lima saluran warna dengan urutan biru, hitam, kuning, putih, dan merah. Sebagai contoh, pesan KOREKSI;ERROR=12.40;B=1.50;H=0.00;K=0.00;P=0.00;M=0.00 menunjukkan bahwa hasil pencampuran memiliki error sebesar 12,40% dan membutuhkan tambahan cat biru sebanyak 1,50 g.

arduino membaca dan memisahkan setiap bagian pesan tersebut, kemudian menyimpan nilai koreksi sesuai channel pompa. Nilai koreksi 0 g menyebabkan pompa terkait dilewati, sedangkan nilai koreksi yang lebih besar dari 0 g digunakan sebagai target penambahan massa. arduino selanjutnya menentukan target kumulatif berdasarkan massa aktual terakhir pada *mixing tank* ditambah massa koreksi yang diterima dari raspberry Pi.

Setelah target koreksi ditentukan, pompa warna yang diperlukan kembali diaktifkan secara berurutan. Pompa bekerja menggunakan PWM 255 ketika massa masih berada di bawah batas switch dan berubah menjadi PWM 120 ketika massa mendekati batas stop. Pompa dimatikan setelah massa aktual mencapai batas stop yang telah disesuaikan dengan karakteristik sisa aliran masing-masing pompa. Dengan demikian, nilai gram hasil analisis HSV tidak hanya ditampilkan sebagai data komunikasi, tetapi secara langsung digunakan arduino sebagai target *Gravimetric Dosing* untuk mengaktifkan kembali pompa koreksi.

## 4.9. Integrasi Sistem

### 4.9.1. Integrasi Metode *Sequential Control*, PWM, dan *Gravimetric Dosing*

Penerapan *Sequential Control*, PWM *Two-stage Dosing*, dan *Gravimetric Dosing* pada penelitian ini dirancang sebagai satu kesatuan sistem yang saling mendukung dalam menghasilkan proses pencampuran cat secara otomatis. Setiap metode memiliki fungsi yang berbeda sehingga tidak dapat bekerja secara optimal apabila diterapkan secara terpisah. *Sequential Control* bertugas mengatur urutan pengeluaran setiap warna sesuai komposisi yang telah ditentukan, PWM *Two-stage Dosing* mengendalikan laju pengeluaran cat melalui dua tingkat kecepatan pompa, sedangkan *Gravimetric Dosing*

memanfaatkan pembacaan massa secara *realtime* sebagai umpan balik untuk mengendalikan proses dosing.

Integrasi ketiga metode tersebut menghasilkan sistem pengendalian yang saling melengkapi. *Sequential Control* mengatur urutan proses, *PWM Two-stage Dosing* mengatur kecepatan pompa selama proses penakaran, sedangkan *Gravimetric Dosing* memastikan proses dosing berlangsung berdasarkan massa aktual yang terbaca oleh *load cell* hingga target tercapai.

#### **4.9.2. Analisis Faktor Penyebab Error pada Sistem**

Akurasi sistem pencampuran cat otomatis pada penelitian ini dipengaruhi oleh beberapa faktor yang saling berkaitan, yaitu karakteristik pompa peristaltik, pengukuran massa menggunakan *load cell*, penerapan *PWM Two-stage Dosing*, serta pengendalian berbasis *Gravimetric Dosing*. Keempat faktor tersebut tidak bekerja secara terpisah, melainkan saling melengkapi sehingga sistem mampu menghasilkan massa keluaran yang mendekati target.

Karakteristik setiap pompa peristaltik menjadi salah satu faktor yang memengaruhi akurasi sistem. Meskipun seluruh pompa menggunakan tipe dan spesifikasi yang sama, hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap pompa memiliki debit yang berbeda. Perbedaan tersebut diduga dipengaruhi oleh variasi karakteristik mekanis, seperti elastisitas selang, tekanan roller, kondisi motor, dan hambatan aliran. Oleh karena itu, setiap pompa memerlukan parameter pengendalian yang disesuaikan berdasarkan hasil pengujian sehingga proses penakaran dapat berlangsung lebih akurat.

Selain karakteristik pompa, akurasi sistem juga dipengaruhi oleh kemampuan *load cell* dalam memberikan umpan balik massa secara *realtime*. Hasil kalibrasi dan validasi menunjukkan bahwa *load cell* memiliki tingkat akurasi yang baik sehingga dapat digunakan sebagai acuan utama dalam proses *Gravimetric Dosing*. Dengan adanya umpan balik massa secara kontinu, sistem tidak bergantung pada estimasi debit atau lama waktu kerja pompa, tetapi menggunakan massa aktual sebagai dasar pengambilan keputusan selama proses penakaran.

Penerapan *PWM Two-stage Dosing* turut berperan dalam meningkatkan akurasi sistem. Penggunaan PWM 255 pada tahap awal memungkinkan proses penakaran

berlangsung lebih cepat, sedangkan perpindahan ke PWM 120 ketika massa mendekati target membuat laju penambahan massa menjadi lebih kecil. Pendekatan tersebut mengurangi kemungkinan terjadinya kelebihan massa yang umumnya muncul apabila pompa tetap bekerja pada kecepatan maksimum hingga mencapai target.

Di sisi lain, metode *Gravimetric Dosing* berfungsi sebagai mekanisme pengendalian utama yang menentukan kapan perpindahan PWM dilakukan dan kapan pompa harus dihentikan berdasarkan massa aktual yang terbaca oleh *load cell*. Parameter  $\Delta m$  threshold dan *stop compensation* yang diperoleh melalui hasil pengujian memungkinkan sistem mengantisipasi sisa aliran cat setelah pompa dimatikan, sehingga massa akhir yang diperoleh menjadi lebih mendekati target.

Secara keseluruhan, akurasi sistem tidak ditentukan oleh satu komponen saja, tetapi merupakan hasil integrasi antara karakteristik pompa, pengukuran massa menggunakan *load cell*, pengaturan kecepatan melalui PWM *Two-stage Dosing*, dan pengendalian berbasis *Gravimetric Dosing*.

#### **4.9.2. Analisis Kelebihan dan Keterbatasan Alat**

Berdasarkan hasil realisasi dan pengujian yang telah dilakukan, sistem pencampuran cat otomatis yang dikembangkan memiliki beberapa kelebihan. Integrasi metode *Sequential Control*, PWM *Two-stage Dosing*, dan *Gravimetric Dosing* memungkinkan proses pencampuran berlangsung secara otomatis, terstruktur, dan berbasis umpan balik massa. Penggunaan *Sequential Control* memastikan setiap pompa bekerja sesuai urutan komposisi yang telah ditentukan sehingga tidak terjadi pengeluaran cat secara bersamaan. Sementara itu, kombinasi PWM *Two-stage Dosing* dan *Gravimetric Dosing* mampu meningkatkan ketepatan penakaran dengan memanfaatkan pembacaan massa aktual sebagai dasar pengambilan keputusan selama proses dosing.

Selain itu, sistem tidak bergantung pada estimasi waktu kerja pompa untuk menentukan jumlah cat yang dikeluarkan. Penggunaan *load cell* sebagai sensor utama memungkinkan massa cat dipantau secara *realtime* sehingga pompa dapat dihentikan ketika massa target telah tercapai. Pendekatan tersebut menjadikan sistem lebih adaptif

terhadap perbedaan karakteristik debit antar pompa dan membantu meningkatkan konsistensi hasil pencampuran pada setiap proses pengujian.

Meskipun demikian, sistem masih memiliki beberapa keterbatasan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap pompa memiliki karakteristik debit yang berbeda sehingga parameter  $\Delta m$  threshold dan *stop compensation* harus ditentukan melalui proses pengujian untuk masing-masing pompa. Dengan demikian, apabila pompa diganti atau karakteristik aliran berubah akibat keausan selang maupun perubahan sifat fluida, proses penentuan parameter perlu dilakukan kembali agar akurasi sistem tetap terjaga.

Selain aspek pengendalian, sistem juga masih memiliki keterbatasan dari sisi perangkat keras. Selama pengoperasian, ujung selang yang berisi cat cenderung mengalami pengeringan apabila tidak segera dibersihkan setelah proses pencampuran selesai. Kondisi tersebut dapat menghambat aliran cat pada penggunaan berikutnya sehingga diperlukan proses pembersihan secara rutin untuk menjaga performa sistem, serta dalam sisi pompa peristaltik juga memiliki keterbatasan dalam Kapasitas debit pompa peristaltik yang digunakan relatif kecil sehingga waktu yang diperlukan untuk mencapai massa target menjadi lebih lama, terutama pada proses pencampuran dengan massa yang besar. Proses pembersihan juga belum praktis karena beberapa komponen mekanik harus dilepas terlebih dahulu, seperti poros (*shaft*) motor DC pengaduk, selang, sertaudukan LED dan kamera yang berada di sekitar area pencampuran. Kondisi ini menyebabkan waktu perawatan menjadi lebih lama dan berpotensi mengurangi kemudahan operasional sistem.

Selain itu, sistem masih menggunakan nilai parameter yang bersifat tetap berdasarkan hasil kalibrasi dan pengujian sebelumnya. Sistem belum memiliki mekanisme adaptif yang dapat memperbarui parameter pengendalian secara otomatis ketika terjadi perubahan karakteristik pompa atau kondisi operasional. rapa komponen utama.

#### **4.9.3. Kesesuaian Hasil Pengujian dengan Tujuan Tugas Akhir**

Berdasarkan hasil realisasi dan pengujian yang telah dilakukan, tugas akhir ini telah memenuhi tujuan yang telah ditetapkan. Sistem pencampuran cat otomatis berhasil direalisasikan dengan mengintegrasikan metode *Sequential Control*, *PWM Two-stage*

*Dosing*, dan *Gravimetric Dosing* sehingga proses penakaran setiap komponen warna dapat berlangsung secara otomatis sesuai urutan, terkontrol, dan berbasis massa aktual.

Hasil tugas akhir ini juga menunjukkan bahwa rumusan masalah yang diajukan telah terjawab melalui implementasi dan pengujian sistem. *Sequential Control* mampu mengatur urutan kerja pompa, *PWM Two-stage Dosing* meningkatkan pengendalian proses penakaran, sedangkan *Gravimetric Dosing* meningkatkan ketepatan massa melalui umpan balik *load cell*. Integrasi ketiga metode tersebut menghasilkan sistem yang mampu melakukan pencampuran cat secara otomatis sesuai dengan tujuan penelitian, meskipun masih terdapat beberapa keterbatasan yang dapat menjadi pengembangan pada penelitian selanjutnya.

#### 4.9.4. Pengujian Sampel Hasil Pencampuran Cat

Pengujian sampel hasil pencampuran cat dilakukan untuk mengetahui keberhasilan sistem dalam menghasilkan warna sesuai dengan komposisi yang telah ditentukan. Pengujian ini dilakukan setelah seluruh proses pencampuran selesai, yaitu setelah pompa peristaltik mengalirkan cat sesuai komposisi warna dan proses pengadukan pada mixing tank telah dilakukan. Sampel hasil pencampuran kemudian diamati secara visual dengan membandingkan warna hasil campuran terhadap warna target pada database sistem.

Pengambilan sampel dilakukan pada beberapa variasi warna untuk mengetahui konsistensi hasil pencampuran. Setiap sampel didokumentasikan menggunakan kamera dengan kondisi pencahayaan yang sama agar hasil pengamatan visual dapat dibandingkan secara objektif. Hasil dokumentasi sampel pencampuran cat ditunjukkan pada Tabel 4.19.

**Tabel 4. 19.** Keterangan Hasil Warna Pencampuran

| No | Warna Target | Komposisi Warna     | Hasil Pengamatan                               |
|----|--------------|---------------------|------------------------------------------------|
| 1  | Violet       | Biru 95% + Merah 5% | Warna hasil pencampuran mendekati warna target |

|   |              |                                                         |                                                |
|---|--------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 2 | Sky Blue     | Biru 99% + Putih 1%                                     | Warna hasil pencampuran mendekati warna target |
| 3 | Orange       | Merah 48% + Kuning 52%                                  | Warna hasil pencampuran mendekati warna target |
| 4 | Hijau Zaitun | Kuning 98% + Hitam 2%                                   | Warna hasil pencampuran mendekati warna target |
| 5 | Hijau        | Biru 50% + Kuning 50%                                   | Warna hasil pencampuran mendekati warna target |
| 6 | Cokelat      | Biru 5% + Hitam 5% + Kuning 35% + Putih 33% + Merah 22% | Warna hasil pencampuran mendekati warna target |

Untuk memperjelas hasil pencampuran yang telah dilakukan pada setiap sampel warna, dokumentasi visual hasil pencampuran disajikan pada . Dokumentasi pada Gambar 4.53. sampai Gambar 4.70. ini digunakan untuk membandingkan konsistensi hasil warna pada tiga kali percobaan untuk setiap jenis warna yang diuji.

**Tabel 4. 20.** Dokumentasi Hasil Pencampuran

| Nama Warna | Hasil 1                                                                             | Hasil 2                                                                              | Hasil 3                                                                               |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Violet     |  |  |  |
|            | <b>Gambar 4. 53.</b><br>Hasil 1 Violet                                              | <b>Gambar 4. 54.</b><br>Hasil 2 Violet                                               | <b>Gambar 4. 55.</b><br>Hasil 3 Violet                                                |
| Sky Blue   |  |  |  |
|            | <b>Gambar 4. 56</b> Hasil<br>1 Sky Blue                                             | <b>Gambar 4. 57.</b><br>Hasil 2 Sky Blue                                             | <b>Gambar 4. 58.</b><br>Hasil 3 Sky Blue                                              |

|              |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Orange       |    |    |    |
|              | <b>Gambar 4. 59.</b><br>Hasil 1 Orange                                              | <b>Gambar 4. 60.</b><br>Hasil 2 Orange                                               | <b>Gambar 4. 61.</b><br>Hasil 3 Orange                                                |
| Hijau Zaitun |    |    |    |
|              | <b>Gambar 4. 62.</b><br>Hasil 1 Hijau Zaitun                                        | <b>Gambar 4. 63.</b><br>Hasil 2 Hijau Zaitun                                         | <b>Gambar 4. 64.</b><br>Hasil 3 Hijau Zaitun                                          |
| Hijau        |    |    |    |
|              | <b>Gambar 4. 65.</b><br>Hasil 1 Hijau                                               | <b>Gambar 4. 66.</b><br>Hasil 2 Hijau                                                | <b>Gambar 4. 67.</b><br>Hasil 3 Hijau                                                 |
| Cokelat      |  |  |  |
|              | <b>Gambar 4. 68.</b><br>Hasil 1 Cokelat                                             | <b>Gambar 4. 69.</b><br>Hasil 2 Cokelat                                              | <b>Gambar 4. 70</b> Hasil<br>1 Cokelat                                                |

Berdasarkan hasil pada Tabel 4.20, meskipun setiap warna target berhasil dihasilkan secara konsisten pada tiga kali percobaan, tetap ditemukan sedikit perbedaan pada hasil akhir pencampuran dibandingkan dengan nilai target yang ditetapkan. Perbedaan ini terjadi karena sistem yang dibangun merupakan gabungan dari tiga metode kontrol, yaitu *Sequential Control*, *PWM Two-stage Dosing*, dan *Gravimetric Dosing*, yang masing-masing memiliki keterbatasan teknis tersendiri meskipun secara keseluruhan telah bekerja dengan baik.

Salah satu penyebab utama adalah adanya overshoot kecil pada tahap dosing, terutama pada proses PWM Two-stage Dosing. Pada tahap dosing kasar (coarse

dosing), sistem mengeluarkan cairan dengan laju alir yang relatif tinggi untuk mendekati target secara cepat, kemudian dilanjutkan dengan tahap dosing halus (fine dosing) untuk melakukan koreksi akhir. Namun karena adanya jeda respons antara sinyal kontrol dan reaksi aktuator (delay eksekusi), volume yang benar-benar keluar sering kali sedikit melebihi atau kurang dari yang diperhitungkan, sehingga muncul selisih kecil pada hasil akhir. Efek ini diperparah oleh sifat non-linear dari hubungan antara duty cycle PWM dengan laju alir aktual, terutama pada duty cycle rendah, di mana perubahan kecil pada sinyal kontrol tidak selalu menghasilkan perubahan volume yang proporsional.

Faktor lain yang juga berperan, meskipun pengaruhnya lebih kecil, adalah karakteristik fisik bahan pencampur itu sendiri. Viskositas cairan warna dapat sedikit berubah akibat perbedaan suhu ruangan antar sesi percobaan, yang pada akhirnya memengaruhi laju alir aktual meskipun parameter kontrol yang digunakan sama. Di samping itu, kemungkinan adanya residu cairan yang masih tertinggal di dalam selang atau nozzle dari percobaan sebelumnya juga dapat sedikit memengaruhi komposisi warna pada percobaan berikutnya.

Secara keseluruhan, Meskipun demikian, jika ditinjau secara kuantitatif berdasarkan hasil pembacaan nilai HSV melalui kamera, selisih antara warna hasil pencampuran dengan warna target masih berada pada rentang error di bawah 10%. Perbedaan yang muncul lebih disebabkan oleh keterbatasan teknis yang bersifat inheren pada sistem kontrol berbasis aktuator dan sensor, bukan karena kegagalan metode yang digunakan.

#### **4.10. Pengujian Tegangan Elektrikal**

##### **4.10.1. Hasil Pengujian Tegangan Sumber 12 VDC**

Pengujian tegangan sumber 12 VDC dilakukan untuk mengetahui kestabilan tegangan utama yang digunakan pada sistem pencampuran cat otomatis. Tegangan 12 VDC digunakan untuk menyuplai beberapa komponen beban, seperti pompa peristaltik, motor mixer, relay, dan lampu indikator. Oleh karena itu, pengujian dilakukan pada beberapa kondisi kerja, yaitu tanpa beban, sistem *Standby*, pompa aktif, dan mixer aktif. Hasil pengukuran tegangan output power supply 12 VDC pada

berbagai kondisi pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.21, dengan dokumentasi pengukuran ditampilkan pada Gambar 4.70 sampai Gambar 4.74.

**Tabel 4. 21.** Pengujian tegangan sumber 12 VDC

| No | Titik Pengukuran           | Kondisi Pengujian     | Tegangan Standar | Tegangan Terukur | Dokumentasi                                                                                                                                                           |
|----|----------------------------|-----------------------|------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Output power supply 12 VDC | Tanpa beban           | 12 VDC           | 12.17 V          |  <p><b>Gambar 4. 71.</b><br/>Output power supply 12 VDC tanpa beban</p>            |
| 2  | Output power supply 12 VDC | Sistem <i>Standby</i> | 12 VDC           | 12.16 V          |  <p><b>Gambar 4. 72.</b><br/>Output power supply 12 VDC Sistem <i>Standby</i></p> |
| 3  | Output power supply 12 VDC | Pompa aktif           | 12 VDC           | 12.16 V          |  <p><b>Gambar 4. 73.</b><br/>Output power</p>                                    |



11,20 V sampai 12,60 V. Dengan demikian, sumber tegangan 12 VDC dapat dinyatakan stabil dan layak digunakan untuk menyuplai beban utama pada sistem pencampuran cat otomatis.

#### 4.10.2. Hasil Pengujian Tegangan Step-down 5 VDC

Pengujian tegangan step-down 5 VDC dilakukan untuk memastikan bahwa rangkaian penurun tegangan XL4015 mampu menghasilkan tegangan yang sesuai untuk bagian kontrol sistem. Tegangan 5 VDC digunakan untuk menyuplai komponen seperti arduino mega pro mini, HX711, dan LCD TFT. Pengujian ini dilakukan karena bagian kontrol membutuhkan tegangan yang stabil agar proses pembacaan sensor, tampilan LCD, dan pengendalian sistem dapat berjalan dengan baik.

Nilai error pada pengujian ini dihitung berdasarkan persamaan error pengukuran yang telah dijelaskan pada Bab II. Hasil pengukuran tegangan pada output step-down XL4015 serta VCC dari masing-masing komponen ditunjukkan pada Tabel 4.22, dengan dokumentasi pengukuran ditampilkan pada Gambar 4.75 sampai Gambar 4.78.

**Tabel 4. 22.** pengujian tegangan step-down 5 VDC

| No | Titik Pengukuran        | Kondisi Pengujian     | Tegangan Standar | Tegangan Terukur | Dokumentasi                                                                                                                                                       |
|----|-------------------------|-----------------------|------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Output step-down XL4015 | Sistem <i>Standby</i> | 5 VDC            | 5.09 V           |  <p><b>Gambar 4. 75.</b><br/>Output step-down saat Sistem <i>Standby</i></p> |

|                                                           |                                    |                          |       |        |                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|-------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 2                                                         | VCC<br>arduino<br>mega pro<br>mini | Sistem<br><i>Standby</i> | 5 VDC | 5.05V  |   |
| <p><b>Gambar 4. 76.</b><br/>VCC arduino mega pro mini</p> |                                    |                          |       |        |                                                                                      |
| 3                                                         | VCC HX711                          | Sistem<br><i>Standby</i> | 5 VDC | 5.08 V |   |
| <p><b>Gambar 4. 77.</b><br/>VCC HX711</p>                 |                                    |                          |       |        |                                                                                      |
| 4                                                         | VCC LCD<br>TFT                     | Sistem<br><i>Standby</i> | 5 VDC | 5.07 V |  |
| <p><b>Gambar 4. 78.</b><br/>VCC LCD TFT</p>               |                                    |                          |       |        |                                                                                      |

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.22, tegangan 5 VDC yang dihasilkan oleh step-down XL4015 dan diterima oleh komponen kontrol berada pada rentang 5,05 V sampai 5,09 V. Tegangan tertinggi terdapat pada output step-down XL4015 sebesar 5,09 V, sedangkan tegangan terendah terdapat pada VCC arduino mega pro mini sebesar 5,05 V.

Selisih tegangan antar titik pengukuran masih relatif kecil. Perbedaan tersebut dapat terjadi karena adanya tahanan pada jalur kabel, sambungan rangkaian, serta konsumsi arus dari masing-masing komponen. Meskipun terdapat sedikit perbedaan

nilai tegangan, seluruh hasil pengukuran masih berada dalam rentang acuan 4,75 V sampai 5,25 V.

Nilai error terbesar terdapat pada output step-down XL4015, yaitu sebesar 1,80%, sedangkan nilai error terkecil terdapat pada VCC arduino mega pro mini, yaitu sebesar 1,00%. Seluruh nilai error masih berada di bawah batas toleransi  $\pm 5\%$ . Dengan demikian, step-down XL4015 dapat dinyatakan mampu menurunkan tegangan dari 12 VDC menjadi 5 VDC dengan baik dan layak digunakan untuk menyuplai bagian kontrol pada sistem pencampuran cat otomatis.

#### 4.10.3. Hasil Pengujian Driver Pompa Peristaltik

Pengujian driver pompa peristaltik dilakukan untuk mengetahui apakah rangkaian driver mampu meneruskan sinyal PWM dari arduino menuju MOSFET sebagai pengendali kerja pompa. Pada sistem ini, pompa peristaltik tidak dikendalikan langsung oleh pin arduino, tetapi melalui rangkaian driver dan MOSFET. Hal ini dilakukan karena pompa bekerja menggunakan tegangan 12 VDC, sedangkan pin arduino hanya berfungsi sebagai pemberi sinyal kendali. Pengujian dilakukan pada dua nilai PWM, yaitu PWM 150 dan PWM 255.

Hasil pengujian gate-source MOSFET dan output pompa ditunjukkan pada Tabel 4.23.

**Tabel 4. 23.** Hasil Pengujian Gate-Source MOSFET dan Output Pompa

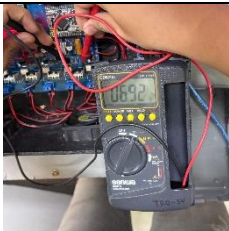
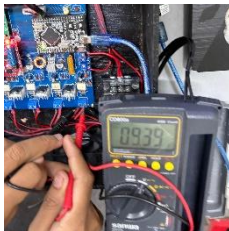
| No | Pompa | Pin<br>arduino | PWM | Duty<br>Cycle<br>(%) | Perhitungan<br>Teori (V) | Tegangan<br>Gate dan<br>Source (V) | Tegangan<br>Output ke<br>Motor (V) |
|----|-------|----------------|-----|----------------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Ke | M1    | D11            | 150 | 58,8                 | 7,06                     | 6.92                               | 9.39                               |
| 2  | M1    | D11            | 255 | 100                  | 12,00                    | 11.86                              | 11.98                              |
| 3  | M2    | D10            | 150 | 58,8                 | 7,06                     | 6                                  | 9                                  |
| 4  | M2    | D10            | 255 | 100                  | 12,00                    | 10.29                              | 11.94                              |
| 5  | M3    | D13            | 150 | 58,8                 | 7,06                     | 6.94                               | 7.96                               |
| 6  | M3    | D13            | 255 | 100                  | 12,00                    | 11.83                              | 11.94                              |
| 7  | M4    | D12            | 150 | 58,8                 | 7,06                     | 6.74                               | 8.95                               |

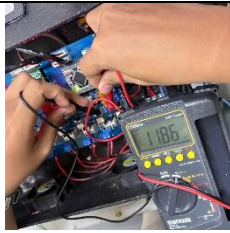
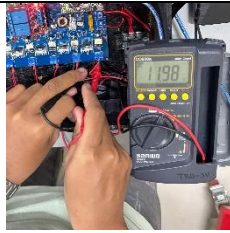
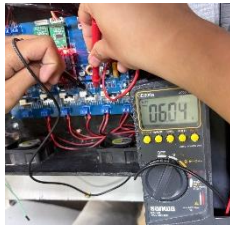
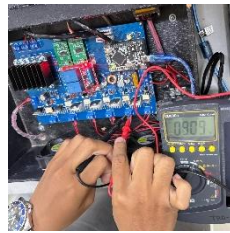
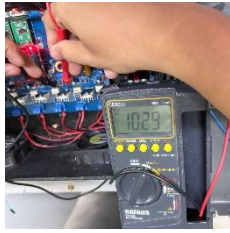
|    |    |     |     |      |       |       |       |
|----|----|-----|-----|------|-------|-------|-------|
| 8  | M4 | D12 | 255 | 100  | 12,00 | 11.83 | 11.95 |
| 9  | M5 | D44 | 150 | 58,8 | 7,06  | 6.91  | 8.8   |
| 10 | M5 | D44 | 255 | 100  | 12,00 | 11.81 | 11.92 |

Berdasarkan Tabel 4.23, tegangan gate-source MOSFET pada PWM 150 berada pada rentang 6,00 V sampai 6,94 V. Nilai ini lebih rendah dibandingkan PWM 255 karena sinyal PWM 150 memiliki *duty cycle* yang lebih kecil. Pada kondisi tersebut, MOSFET tidak berada pada kondisi ON penuh sepanjang waktu, tetapi bekerja secara bergantian antara kondisi ON dan OFF sesuai pulsa PWM. Oleh karena itu, nilai yang terbaca pada multimeter merupakan tegangan rata-rata.

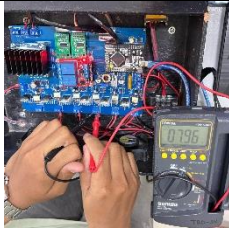
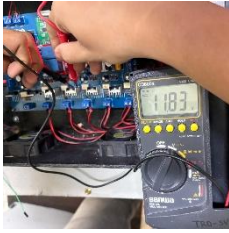
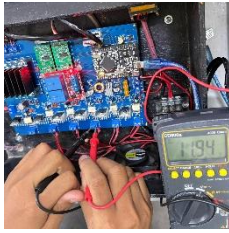
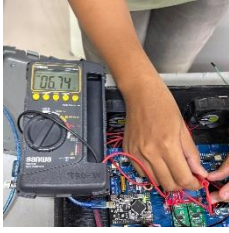
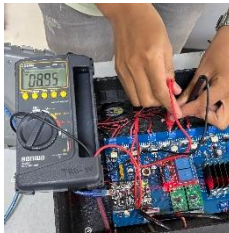
Hasil pengukuran tegangan Gate-Source dan tegangan output pada masing-masing motor (M1–M5) untuk variasi nilai PWM 150 dan 255 ditunjukkan pada Tabel 4.24, dengan dokumentasi pengukuran untuk tiap kondisi ditampilkan pada Gambar 4.79 sampai Gambar 4.98.

**Tabel 4. 24.** Dokumentasi Pengujian Gate-Source MOSFET dan Output Pompa

| No | Pompa | PWM | Tegangan<br>Gate dan<br>Source<br>(V) | Dokumentasi                                                                                                                                             | Tegangan<br>Output<br>Motor<br>(V) | Dokumentasi                                                                                                                                           |
|----|-------|-----|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | M1    | 150 | 6.92                                  |  <p><b>Gambar 4. 79.</b><br/>Tegangan Gate dan Source M1 PWM 150</p> | 9.39                               |  <p><b>Gambar 4. 80.</b><br/>Tegangan Output Motor 1 PWM 150</p> |

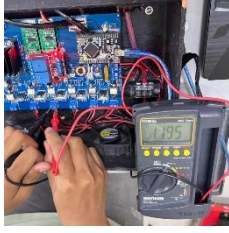
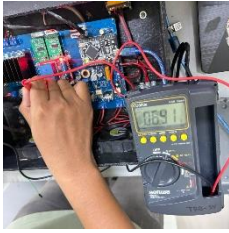
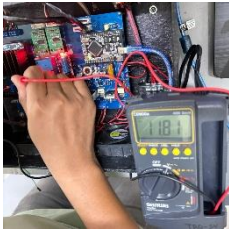
|    |     |       |                                                                                   |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |
|----|-----|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| M1 | 255 | 11.86 |  | 11.98                                                                               |  |                                                                                       |
|    |     |       | <b>Gambar 4. 81.</b><br>Tegangan Gate<br>dan Source M1<br>PWM 255                 | <b>Gambar 4. 82.</b><br>Tegangan<br>Output Motor 1<br>PWM 255                       |                                                                                     |                                                                                       |
| 3  | M2  | 150   | 6                                                                                 |    | 9                                                                                   |   |
|    |     |       | <b>Gambar 4. 83.</b><br>Tegangan Gate<br>dan Source M2<br>PWM 150                 | <b>Gambar 4. 84.</b><br>Tegangan<br>Output Motor 2<br>PWM 150                       |                                                                                     |                                                                                       |
| 4  | M2  | 255   | 10.29                                                                             |  | 11.94                                                                               |  |
|    |     |       | <b>Gambar 4. 85.</b><br>Tegangan Gate<br>dan Source M2<br>PWM 255                 | <b>Gambar 4. 86.</b><br>Tegangan<br>Output Motor 2<br>PWM 255                       |                                                                                     |                                                                                       |

---

|   |    |     |       |                                                                                     |       |                                                                                       |
|---|----|-----|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 | M3 | 150 | 6.94  |    | 7.96  |    |
|   |    |     |       | <b>Gambar 4. 87.</b><br>Tegangan Gate<br>dan Source M3<br>PWM 150                   |       | <b>Gambar 4. 88.</b><br>Tegangan<br>Output Motor 3<br>PWM 150                         |
| 6 | M3 | 255 | 11.83 |    | 11.94 |   |
|   |    |     |       | <b>Gambar 4. 89.</b><br>Tegangan Gate<br>dan Source M3<br>PWM 255                   |       | <b>Gambar 4. 90.</b><br>Tegangan<br>Output Motor 3<br>PWM 255                         |
| 7 | M4 | 150 | 6.74  |  | 8.95  |  |
|   |    |     |       | <b>Gambar 4. 91.</b><br>Tegangan M4<br>Gate dan Source<br>PWM 150                   |       | <b>Gambar 4. 92.</b><br>Tegangan<br>Output Motor 4<br>PWM 150                         |

---

---

|    |    |     |       |                                                                                     |       |                                                                                       |
|----|----|-----|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 8  | M4 | 255 | 11.83 |    | 11.95 |    |
|    |    |     |       | <b>Gambar 4. 93.</b><br>Tegangan Gate<br>dan Source M4<br>PWM 255                   |       | <b>Gambar 4. 94.</b><br>Tegangan<br>Output Motor 4<br>PWM 255                         |
| 9  | M5 | 150 | 6.91  |    | 8.8   |    |
|    |    |     |       | <b>Gambar 4. 95.</b><br>Tegangan Gate<br>dan Source M5<br>PWM 150                   |       | <b>Gambar 4. 96.</b><br>Tegangan<br>Output Motor 5<br>PWM 150                         |
| 10 | M5 | 255 | 11.81 |  | 11.92 |  |
|    |    |     |       | <b>Gambar 4. 97.</b><br>Tegangan Gate<br>dan Source M5<br>PWM 255                   |       | <b>Gambar 4. 98.</b><br>Tegangan<br>Output Motor 5<br>PWM 255                         |

---

Dokumentasi hasil pengujian MOSFET ditampilkan pada Tabel 4.24. Realisasi rangkaian driver pompa berbasis MOSFET telah diimplementasikan sesuai dengan rancangan elektrikal pada Bab III. Rangkaian terdiri atas lima channel driver yang masing-masing digunakan untuk mengendalikan satu pompa peristaltik sehingga setiap warna cat dapat dikontrol secara terpisah sesuai urutan kerja sistem. Setiap channel menggunakan kombinasi TLP250 sebagai driver gate dan MOSFET IRLZ44N sebagai saklar elektronik untuk mengendalikan suplai tegangan 12 VDC menuju pompa. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa rangkaian mampu menerima sinyal kendali dari arduino serta mengendalikan pompa melalui mode ON/OFF maupun PWM.

Pengujian dilakukan pada dua kondisi operasi, yaitu PWM 255 sebagai tahap dosing cepat dan PWM 150 sebagai tahap dosing presisi. Parameter yang diamati meliputi tegangan masukan driver, tegangan gate-source MOSFET, dan tegangan keluaran menuju pompa.

Pada PWM 255, tegangan gate-source sebagian besar berada pada rentang 11,81 V sampai 11,86 V. Nilai ini mendekati tegangan driver 12 V sehingga MOSFET bekerja pada kondisi ON penuh. Pada channel M2, tegangan gate-source tercatat sebesar 10,29 V. Meskipun lebih rendah dibandingkan channel lainnya, tegangan keluaran pompa masih mencapai 11,94 V sehingga pompa tetap beroperasi dengan normal. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh titik pengukuran, tahanan jalur, sambungan rangkaian, maupun variasi karakteristik masing-masing channel driver.

Pada pengujian tegangan keluaran pompa menggunakan PWM 255 diperoleh nilai antara 11,92 V hingga 11,98 V. Nilai tersebut mendekati tegangan sumber 12 VDC sehingga menunjukkan bahwa driver mampu menyalurkan tegangan hampir penuh ke pompa. Kondisi ini sesuai dengan kebutuhan tahap dosing cepat agar pompa menghasilkan debit aliran yang tinggi ketika selisih massa terhadap target masih besar.

Pada PWM 150, tegangan keluaran pompa berada pada rentang 7,96 V hingga 9,39 V. Nilai ini lebih rendah dibandingkan PWM 255 sehingga menunjukkan bahwa perubahan nilai PWM memengaruhi tegangan rata-rata yang diterima pompa. Secara teoritis, PWM 150 pada sumber 12 V memiliki tegangan rata-rata sekitar 7,06 V,

mengikuti prinsip bahwa tegangan rata-rata keluaran PWM berbanding lurus dengan besarnya *duty cycle* terhadap tegangan sumber (Khakim, Sunarno, & Sugiyanto, 2012). Hasil pengukuran yang lebih tinggi dari nilai teoritis ini sejalan dengan temuan Khakim et al. (2012), yang dalam pengujian PWM pada motor DC juga melaporkan adanya selisih antara tegangan teoritis dan tegangan hasil pengukuran alat, dengan error pengukuran. Penyimpangan tersebut dapat disebabkan oleh karakteristik sinyal PWM yang berupa pulsa, sehingga pembacaan multimeter tidak selalu identik dengan nilai rata-rata teoritis, mengingat alat ukur seperti multimeter memiliki toleransi dan tingkat akurasi tersendiri dalam membaca sinyal yang tidak murni DC (Falka & Bahar, 2022).

Selain itu, sifat induktif motor DC pada pompa peristaltik menyebabkan arus tidak dapat berubah secara seketika saat MOSFET switching, sehingga gelombang tegangan tidak murni berbentuk kotak seperti asumsi teoritis. Dioda flyback yang berfungsi menyalurkan arus sisa akibat sifat induktif tersebut turut membuat tegangan tidak langsung nol saat kondisi OFF, melainkan meluruh secara bertahap (Fauzi dkk., 2023). Kapasitor filter pada rangkaian driver juga cenderung menahan muatan mendekati nilai puncak tegangan, bukan murni nilai rata-rata, sehingga hasil pengukuran cenderung sedikit lebih tinggi dari nilai teoritis. Toleransi tegangan catu daya serta akurasi multimeter dalam membaca sinyal (bukan DC murni) akan menyumbang deviasi antara nilai teoritis dan hasil pengukuran (Falka & Bahar, 2022).

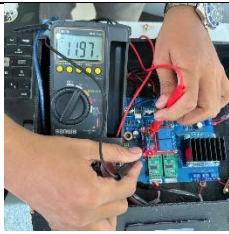
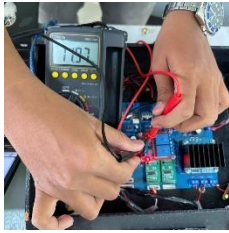
#### **4.10.4. Hasil Pengujian Relay dan Lampu Indikator**

Pengujian relay dan lampu indikator dilakukan untuk memastikan bahwa rangkaian indikator pada sistem pencampuran cat otomatis dapat bekerja sesuai kondisi operasi alat. Relay digunakan sebagai saklar elektronik untuk mengaktifkan lampu indikator, sedangkan lampu indikator digunakan sebagai penanda kondisi sistem. Lampu indikator merah digunakan untuk menunjukkan bahwa sistem sedang berjalan, sedangkan lampu indikator hijau digunakan untuk menunjukkan bahwa proses telah selesai.

Nilai error pada pengujian ini dihitung berdasarkan persamaan error pengukuran yang telah dijelaskan pada Bab II. Hasil pengujian relay dan lampu indikator ditunjukkan pada Tabel 4.24.

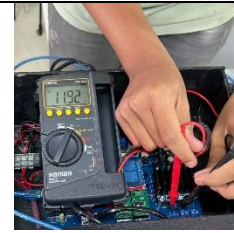
Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.24, tegangan relay channel 1 dan relay channel 2 saat kondisi ON terukur sebesar 11,97 V. Nilai tersebut mendekati tegangan standar 12 VDC dan masih berada pada rentang acuan 11,20–12,60 V. Hal ini menunjukkan bahwa relay mendapatkan suplai tegangan yang sesuai untuk bekerja sebagai saklar pada rangkaian indikator. Hasil pengujian tegangan pada relay channel 1 dan channel 2, baik pada kondisi ON, sistem berjalan, maupun proses selesai, ditunjukkan pada Tabel 4.25, dengan dokumentasi pengukuran ditampilkan pada Gambar 4.99 sampai Gambar 4.102.

**Tabel 4. 25.** pengujian relay

| No | Komponen        | Kondisi | Tegangan Standar | Tegangan Terukur | Dokumentasi                                                                                                                                     |
|----|-----------------|---------|------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Relay channel 1 | ON      | 12 VDC           | 11.97 V          |  <p><b>Gambar 4. 99.</b><br/>Tegangan Relay channel 1</p>   |
| 2  | Relay channel 2 | ON      | 12 VDC           | 11.97 V          |  <p><b>Gambar 4. 100.</b><br/>Tegangan Relay channel 2</p> |

---

|   |                            |                 |        |         |
|---|----------------------------|-----------------|--------|---------|
| 3 | Lampu indikator merah (NC) | Sistem berjalan | 12 VDC | 11.92 V |
|---|----------------------------|-----------------|--------|---------|



**Gambar 4. 101.** Relay channel 1 Sistem Berjalan

|   |                       |                |        |         |
|---|-----------------------|----------------|--------|---------|
| 4 | Lampu indikator hijau | Proses selesai | 12 VDC | 11.97 V |
|---|-----------------------|----------------|--------|---------|



**Gambar 4. 102.** Relay channel 2 Sistem Berjalan

---

Rekapitulasi hasil pengujian relay disajikan pada Tabel 4.25. Pada pengujian lampu indikator, tegangan lampu merah saat sistem berjalan terukur sebesar 11,92 V, sedangkan tegangan lampu hijau saat proses selesai terukur sebesar 11,97 V. Kedua nilai tersebut masih berada pada rentang tegangan kerja yang sesuai. Perbedaan kecil antara tegangan standar dan tegangan hasil pengukuran dapat terjadi karena adanya tahanan pada kabel, sambungan, kontak relay, serta kondisi beban lampu saat aktif.

Nilai error terbesar terdapat pada lampu indikator merah, yaitu sebesar 0,67%. Sementara itu, relay channel 1, relay channel 2, dan lampu indikator hijau memiliki error sebesar 0,25%. Seluruh nilai error masih tergolong kecil dan berada dalam batas yang dapat diterima. Dengan demikian, relay dan lampu indikator dapat dinyatakan bekerja dengan baik sebagai bagian dari sistem penanda kondisi alat.