

HALAMAN PERSETUJUAN LAPORAN TUGAS AKHIR

Rancang Bangun Sistem Pencampuran Cat Otomatis Menggunakan Pompa Peristaltik Dengan Metode *Sequential Control*, PWM Control, dan *Gravimetric Dosing*

Diajukan oleh :
Muhammad daffa raihan
40040322650035

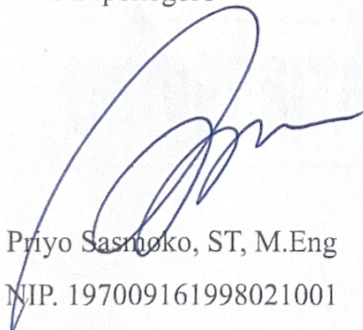
TELAH DISETUJUI DAN DITERIMA DENGAN BAIK OLEH
DOSEN PEMBIMBING,



Aulia Istiqomah, SST., M.T.
NIP. 199306122024062002

Tanggal 31 Juli 2026

Mengetahui
Ketua
Program Studi S.Tr Teknologi Rekayasa Otomasi
Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi
Universitas Diponegoro



Priyo Sasmitoko, ST, M.Eng
NIP. 197009161998021001

Tanggal 31 Juli 2026

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN TUGAS AKHIR

Rancang Bangun Sistem Pencampuran Cat Otomatis Menggunakan Pompa
Peristaltik Dengan Metode *Sequential Control*, PWM Control, dan *Gravimetric*

Dosing

Disusun oleh:

Muhammad Daffa Raihan

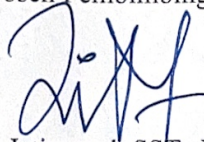
NIM 40040322650035

Telah diujikan dan dinyatakan lulus oleh Tim Penguji

31 Juli 2026

Tim penguji,

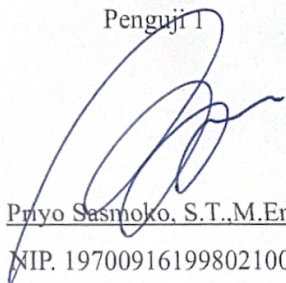
Dosen Pembimbing



Aulia Istiqomah SST., M.T.

NIP. 199306122024062002

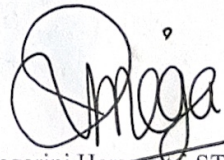
Penguji 1



Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng

NIP. 197009161998021001

Penguji 2



Megarini Hersaputri ST, MT.

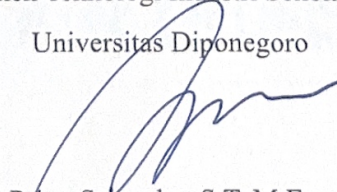
NIP. 198902142020122012

Mengetahui

Ketua Program Studi S.Tr Teknologi Rekayasa Otomasi

Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi

Universitas Diponegoro



Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng

NIP. 197009161998021001

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

Nama : Muhammad Daffa Raihan
NIM : 40040322650035
Program Studi : S.Tr Teknologi Rekayasa Otomasi
Judul Tugas Akhir : Rancang Bangun Sistem Pencampuran Cat Otomatis
Menggunakan Pompa Peristaltik Dengan Metode
Sequential Control, PWM Control, dan *Gravimetric
Dosing*

Dengan ini menyatakan bahwa dalam tugas akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh derajat keahlian di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka. Apabila dikemudian hari terbukti plagiat dalam tugas akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan Mendiknas RI No 17 Tahun 2010 dan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Semarang 31 Juli 2026

Penulis



Muhammad Daffa Raihan

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat, karunia, serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul *"Rancang Bangun Sistem Pencampuran Cat Otomatis Menggunakan Pompa Peristaltik dengan Metode Sequential Control, PWM Control, dan Gravimetric Dosing"* sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan pada Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi.

Penyusunan laporan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dukungan, serta motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Budiyono, M.Si., selaku Dekan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.
2. Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi, Departemen Teknologi Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro.
3. Aulia Istiqomah, S.ST., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, serta motivasi selama proses penyusunan dan penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan tenaga kependidikan Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan bantuan selama penulis menempuh pendidikan.
5. Kedua orang tua, Nadhira Syafa Aulia dan seluruh keluarga yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, dukungan moral maupun material, serta semangat kepada penulis.
6. Tsabitha Salsabila Keisya Hadi atas dukungan dan bantuan yang diberikan selama proses penyelesaian tugas akhir ini. Terima kasih telah membantu dalam proses pengerjaan alat, hingga menemani proses pelaksanaan penelitian.
7. Rio Lesmana S.T., Zulham Amin Ristianto, Aura Damayanti, Aidi Sulthan Nazira, dan Hafidz Maulana atas dukungan, bantuan, serta kebersamaan yang telah diberikan selama proses tugas akhir ini.

8. Teman-teman khususnya "Calon-Calon Orang Sukses", dan "PT Asikin aja" atas kebersamaan, dukungan, dan semangat yang telah diberikan selama masa perkuliahan hingga proses penyelesaian tugas akhir ini.
9. Rekan-rekan mahasiswa Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi dan semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih memiliki keterbatasan dan belum sepenuhnya sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi penyempurnaan karya ini di masa mendatang.

Akhir kata, penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang sistem kendali dan otomasi industri, serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

Semarang, 31 Juli 2026

Penulis



Muhammad Daffa Raihan

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN LAPORAN TUGAS AKHIR.....	ii
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xvii
INTISARI.....	xx
ABSTRACT	xxi
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL	xxii
BAB I.....	27
PENDAHULUAN.....	27
1.1. Latar Belakang.....	27
1.2. Perumusan masalah	29
1.3. Tujuan Tugas Akhir	30
1.4. Manfaat Tugas Akhir	30
1.5. Pembatasan Masalah	31
1.6. Sistematika Laporan Tugas Akhir	31
BAB II	35
DASAR TEORI	35
2.1. Tinjauan Pustaka	35
2.2. Sistem Pencampuran Cairan	39
2.3. Metode Pengendalian yang Digunakan.....	40
2.3.1. <i>Sequential Control</i>	40
2.3.2. <i>PWM (Pulse Width Modulation)</i>	42
2.3.3. <i>Gravimetric Dosing</i>	44
2.4. Komponen Sistem.....	48

2.4.1.	Arduino Mega Pro mini	48
2.4.2.	Raspberry Pi 4 Modul B.....	50
2.4.3.	Pompa Peristaltik NKP-DC-S10B	51
2.4.4.	<i>Load cell</i> 10 kg dan Modul HX711	53
2.4.5.	Motor DC 555 12V	58
2.4.6.	Drive Module BTS7960	64
2.4.7.	MOSFET IRLZ44N.....	65
2.4.8.	LCD TFT 3.5 inch	67
2.4.9.	Module Step-Down XL4015	68
2.4.10.	Power supply 10A/12V	69
2.4.11.	Pilot Lamp 12VDC.....	70
2.4.12.	Relay 2 Channel 12V	71
2.4.13.	Dioda SS34.....	72
2.4.14.	Kapasitor.....	73
2.4.15.	Resistor	74
2.4.16.	Fuse	74
2.4.17.	Optocoupler TLP250.....	75
2.5.	Pengukuran Tegangan	76
2.5.1.	Error Pengukuran	76
BAB III		79
METODE PENELITIAN		79
3.1.	Diagram blok	79
3.1.1.	Diagram Blok sistem	79
3.1.2.	Blok Sensor (<i>Feedback Closed Loop System</i>).....	81
3.2.	Perancangan <i>Hardware</i>.....	82
3.2.1.	Gambar 3D	82
3.2.2.	Hasil Realisasi Perangkat Keras	90
3.3.	Spesifikasi dan Fitur	98

3.3.1	Tabung Penyimpanan Warna	98
3.3.2.	Tabung Pencampuran Cat	99
3.3.3.	Sistem Pengukuran Massa.....	100
3.3.4.	Sistem Kontrol	100
3.4.	Teknik Fabrikasi	101
3.4.1.	<i>Flowchart</i> Sistem	101
3.4.2.	<i>Flowchart</i> Metode.....	107
3.4.3.	<i>Flowchart</i> Komunikasi Sistem	112
3.4.4.	Perancangan Elektrikal	114
3.4.5.	Perancangan Perangkat Lunak	121
3.4.6.	Penentuan Kebutuhan Torsi Motor Pengaduk	127
3.4.7.	Program Pemilihan Warna dan Komposisi Cat.....	131
3.4.8.	Program Pengendalian Pompa Secara <i>Sequential</i>	134
3.4.9.	Program <i>Two-stage Dosing</i>	135
3.4.10.	Program <i>Gravimetric Dosing</i> Berbasis <i>load cell</i>	137
3.4.11.	Program Pengendalian Motor Pengaduk	140
3.4.12.	Program Komunikasi USB Serial Arduino Dengan raspberry Pi	142
3.4.13.	Program Eksekusi Dosing Koreksi Warna	146
3.4.14.	Komposisi pencampuran warna cat	149
BAB IV		151
PENGUJIAN DAN ANALISA		151
4.1.	Gambaran Umum Hasil Perancangan.....	151
4.2.	Hasil Realisasi Perangkat Lunak.....	151
4.2.1.	Hasil Tampilan Menu LCD TFT	151
4.2.2.	Implementasi <i>Sequential Control</i> pada Urutan Pengeluaran Cat	159
4.2.3.	Implementasi PWM Control pada Pompa Peristaltik.....	159
4.2.4.	Implementasi <i>Gravimetric Dosing</i> Berbasis <i>load cell</i>	160
4.3.	Hasil Pengukuran <i>load cell</i> pada <i>mixing tank</i>	160

4.3.1.	Hasil Pengujian Kalibrasi dan Validasi Sensor <i>load cell</i>	160
4.3.2.	Hasil Pengujian Akurasi dan presisi Pembacaan Massa	164
4.4.	Hasil Pengujian Pompa Peristaltik.....	170
4.4.1.	Pengujian Debit Aliran Cat pada Setiap Pompa	171
4.4.2.	Pengujian Kestabilan Aliran Cat.....	174
4.4.3.	Analisis Pengaruh PWM terhadap Jumlah Cat yang Dikeluarkan	176
4.5.	Hasil Pengujian Metode <i>Sequential Control</i>	177
4.5.1.	Pengujian Urutan Kerja Pompa Berdasarkan Komposisi Warna	177
4.6.	Hasil Pengujian Metode <i>Gravimetric Dosing</i>	178
4.6.1.	Pengujian Overshoot dan Sisa Aliran Pompa	179
4.6.2.	Penentuan Waktu Delay dan Δm threshold	181
4.6.3.	Implementasi Parameter Final <i>Two-stage Dosing</i>	182
4.6.4.	Validasi Akurasi dan Konsistensi <i>Gravimetric Two-stage Dosing</i>	183
4.7.	Hasil Pengujian Sistem Pengaduk	187
4.7.1.	Pengujian Waktu Pengadukan.....	187
4.7.2.	Analisis Kinerja Motor Pengaduk terhadap Hasil Campuran	190
4.8.	Hasil Pengujian Komunikasi Raspberry Pi Dan Arduino.....	192
4.8.1.	Pengujian Pengiriman Data <i>READY</i>	192
4.8.2.	Pengujian Penerimaan dan Eksekusi Data KOREKSI	193
4.9.	Integrasi Sistem	196
4.9.1.	Integrasi Metode <i>Sequential Control</i> , PWM, dan <i>Gravimetric Dosing</i> 196	
4.9.2.	Analisis Kelebihan dan Keterbatasan Alat	198
4.9.3.	Kesesuaian Hasil Pengujian dengan Tujuan Tugas Akhir	199
4.9.4.	Pengujian Sampel Hasil Pencampuran Cat.....	200
4.10.	Pengujian Tegangan Elektrikal.....	203
4.10.1.	Hasil Pengujian Tegangan Sumber 12 VDC.....	203
4.10.2.	Hasil Pengujian Tegangan Step-down 5 VDC.....	206
4.10.3.	Hasil Pengujian Driver Pompa Peristaltik	208

4.10.4. Hasil Pengujian Relay dan Lampu Indikator	214
BAB V	217
PENUTUP	217
5.1. Kesimpulan	217
5.2. Saran.....	218
DAFTAR PUSTAKA.....	219
LAMPIRAN.....	226

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Flowchart cara kerja Sequential Control	41
Gambar 2. 2. Bentuk gelombang PWM [16]	42
Gambar 2. 3. arduino Mega 2560 Pro Mini [21]	48
Gambar 2. 4. Raspberry pi 4B[23]	50
Gambar 2. 5. Peristaltik NKP-DC-S10 [26]	52
Gambar 2. 6. load cell [27]	53
Gambar 2. 7 Modul HX711 [28]	54
Gambar 2. 8. 555 HIGH Torque [34]	59
Gambar 2. 9. Skematik BTS7960 [37]	64
Gambar 2. 10. simbol skematik MOSFET N-channel [39]	66
Gambar 2. 11. LCD Display Module 3.6 Inch [41]	67
Gambar 2. 12. Rangkaian Skematik Buck converter	69
Gambar 2. 13. I/O Power Supply [45]	70
Gambar 2. 14. Pilot Lamp [46]	71
Gambar 2. 15. Relay 2 Channel 12V [47]	72
Gambar 2. 16. Schottky [48]	72
Gambar 2. 17. Kapasitor elco [49]	73
Gambar 2. 18. Resistor [50]	74
Gambar 2. 19. Fuse [53]	75
Gambar 2. 20. Gambar dan Skematik TLP250[54]	75
Gambar 3. 1. Diagram Blok Sistem	79
Gambar 3. 2. Diagram blok Closed Loop System	81
Gambar 3. 3. Isometric	82
Gambar 3. 4. Tampak Belakang	83
Gambar 3. 5. Penamaan Komponen 3D	84
Gambar 3. 6. (a) Ukuran tampak atas, (b) Ukuran tampak depan, (c) Ukuran tampak samping	87
Gambar 3. 7. Tampak pendistribusi warna	88
Gambar 3. 8. Tabung Proses Mixing tank	89

Gambar 3. 9. Realisasi Kerangka Alat.....	90
Gambar 3. 10. Penempatan pompa peristaltik	96
Gambar 3. 11. Realisasi load cell sebagai sensor pembaca massa mixing tank	97
Gambar 3. 12. Penempatan load cell bagian bawah mixing tank.....	98
Gambar 3. 13. (a) Persiapan Sistem (b) Dosing Berbasis Massa	102
Gambar 3. 14. (a) mixing dan Evaluasi awal (b) Koreksi Warna (c) Output Akhir	103
Gambar 3. 15. Flowchart sequential.....	107
Gambar 3. 16. <i>Flowchart PWM</i>	109
Gambar 3. 17. Flowchart Gravimetric.....	110
Gambar 3. 18. Flowchart Komunikasi.....	113
Gambar 3. 19. Skematik rangkaian elektrikl	115
Gambar 3. 20. Elektrikal system	116
Gambar 3. 21. Rangkaian Driver MOSFET	120
Gambar 3. 22. Tampilan Awal Program Kalibrasi Touchscreen.....	125
Gambar 3. 23. Proses Kalibrasi Touchscreen	125
Gambar 3. 24. Hasil kalibrasi LCD	126
Gambar 4. 1. Tampilan awal LCD TFT Touchscreen.....	152
Gambar 4. 2. Tampilan menu pemilihan warna halaman pertama	152
Gambar 4. 3. Tampilan menu pemilihan warna halaman kedua.....	153
Gambar 4. 4. Tampilan komposisi bahan warna pada LCD TFT	153
Gambar 4. 5. Tampilan status pengecekan load cell.....	154
Gambar 4. 6. Tampilan peringatan load cell error pada LCD TFT.....	154
Gambar 4. 7. Tampilan proses dosing awal	155
Gambar 4. 8. Tampilan proses mixing pada LCD TFT	155
Gambar 4. 9. Tampilan proses analisis warna	156
Gambar 4. 10. Tampilan hasil analisis warna	156
Gambar 4. 11. Tampilan koreksi warna pada LCD TFT	157
Gambar 4. 12. Tampilan proses pompa koreksi warna.....	157
Gambar 4. 13. Tampilan proses output cat	158
Gambar 4. 14. Tampilan proses selesai pada LCD TFT	158

Gambar 4. 15. Tampilan cat siap diambil	158
Gambar 4. 16. Grafik error sensor load cell 10 kg	162
Gambar 4. 17. Grafik Linearitas 10 kg	163
Gambar 4. 18. Grafik hubungan beban standar terhadap rata rata pembacaan loadacell	167
Gambar 4. 19. Hubungan Nilai PWM terhadap Debit Pompa	172
Gambar 4. 20. Proses selesai	178
Gambar 4. 21. Pompa M5 (Merah).....	178
Gambar 4. 22. Pompa M4 (Putih).....	178
Gambar 4. 23. Pompa M3 (Kuning).....	178
Gambar 4. 24. Pompa M2 (Hitam).....	178
Gambar 4. 25. Pompa M1 (Biru).....	178
Gambar 4. 26. Setup Pengujian Gravimetric pada Pompa Peristaltik	179
Gambar 4. 27. Sebelum Mixing 250gr	188
Gambar 4. 28. Waktu Mixing 250	188
Gambar 4. 29. Setelah mixing 250	188
Gambar 4. 30. Sebelum Mixing 500.....	189
Gambar 4. 31. Waktu Mixing 500	189
Gambar 4. 32. Setelah Mixing 500.....	189
Gambar 4. 33. Sebelum Mixing 750.....	189
Gambar 4. 34. Waktu Mixing 750	189
Gambar 4. 35. Setelah Mixing 750.....	189
Gambar 4. 36. Sebelum Mixing 1000.....	189
Gambar 4. 37. Waktu Mixing 1000	189
Gambar 4. 38. Setelah Mixing 1000.....	189
Gambar 4. 39. Sebelum Mixing 1250.....	189
Gambar 4. 40. Waktu Mixing 1250	189
Gambar 4. 41. Setelah Mixing 1250.....	189
Gambar 4. 42. Grafik hubungan massa cat terhadap waktu mixing.....	190
Gambar 4. 43. Data serial “READY” di terima percobaan 1	192

Gambar 4. 44. Data serial “READY” di terima percobaan 2	193
Gambar 4. 45. Data serial “READY” di terima percobaan 3	193
Gambar 4. 46. Data serial “READY” di terima percobaan 4	193
Gambar 4. 47. Data serial “READY” di terima percobaan 5	193
Gambar 4. 48. Penerimaan Data koreksi percobaan 1	195
Gambar 4. 49. Penerimaan Data koreksi percobaan 2	195
Gambar 4. 50. Penerimaan Data koreksi percobaan 3	195
Gambar 4. 51. Penerimaan Data koreksi percobaan 4	195
Gambar 4. 52. Penerimaan Data koreksi percobaan 5	195
Gambar 4. 53. Hasil 1 Violet	201
Gambar 4. 54. Hasil 2 Violet	201
Gambar 4. 55. Hasil 3 Violet	201
Gambar 4. 56 Hasil 1 Sky Blue	201
Gambar 4. 57. Hasil 2 Sky Blue	201
Gambar 4. 58. Hasil 3 Sky Blue	201
Gambar 4. 59. Hasil 1 Orange	202
Gambar 4. 60. Hasil 2 Orange	202
Gambar 4. 61. Hasil 3 Orange	202
Gambar 4. 62. Hasil 1 Hijau Zaitun.....	202
Gambar 4. 63. Hasil 2 Hijau Zaitun.....	202
Gambar 4. 64. Hasil 3 Hijau Zaitun.....	202
Gambar 4. 65. Hasil 1 Hijau	202
Gambar 4. 66. Hasil 2 Hijau	202
Gambar 4. 67. Hasil 3 Hijau	202
Gambar 4. 68. Output power supply 12 VDC tanpa beban	204
Gambar 4. 69. Output power supply 12 VDC Sistem Standby	204
Gambar 4. 70. Output power supply 12 VDC Pompa aktif.....	204
Gambar 4. 71. Output power supply 12 VDC Pompa aktif Mixer aktif.....	205
Gambar 4. 72. Output step-down saat Sistem Standby	206
Gambar 4. 73. VCC arduino mega pro mini.....	207

Gambar 4. 74.	VCC HX711.....	207
Gambar 4. 75.	VCC LCD TFT	207
Gambar 4. 76.	Tegangan Gate dan Source M1 PWM 150	209
Gambar 4. 77.	Tegangan Output Motor 1 PWM 150	209
Gambar 4. 78.	Tegangan Gate dan Source M1 PWM 255	210
Gambar 4. 79.	Tegangan Output Motor 1 PWM 255	210
Gambar 4. 80.	Tegangan Gate dan Source M2 PWM 150	210
Gambar 4. 81.	Tegangan Output Motor 2 PWM 150	210
Gambar 4. 82.	Tegangan Gate dan Source M2 PWM 255	210
Gambar 4. 83.	Tegangan Output Motor 2 PWM 255	210
Gambar 4. 84.	Tegangan Gate dan Source M3 PWM 150	211
Gambar 4. 85.	Tegangan Output Motor 3 PWM 150	211
Gambar 4. 86.	Tegangan Gate dan Source M3 PWM 255	211
Gambar 4. 87.	Tegangan Output Motor 3 PWM 255	211
Gambar 4. 88.	Tegangan M4 Gate dan Source PWM 150	211
Gambar 4. 89.	Tegangan Output Motor 4 PWM 150	211
Gambar 4. 90.	Tegangan Gate dan Source M4 PWM 255	212
Gambar 4. 91.	Tegangan Output Motor 4 PWM 255	212
Gambar 4. 92.	Tegangan Gate dan Source M5 PWM 150	212
Gambar 4. 93.	Tegangan Output Motor 5 PWM 150	212
Gambar 4. 94.	Tegangan Gate dan Source M5 PWM 255	212
Gambar 4. 95.	Tegangan Output Motor 5 PWM 255	212
Gambar 4. 96.	Tegangan Relay channel 1	215
Gambar 4. 97.	Tegangan Relay channel 2	215
Gambar 4. 98.	Relay channel 1 Sistem Berjalan	216
Gambar 4. 99.	Relay channel 2 Sistem Berjalan	216

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Tinjauan Pustaka.....	35
Tabel 2. 2. Spesifikasi Aruino mega pro mini	49
Tabel 2. 3. Spesifikasi raspberry pi 4B.....	50
Tabel 2. 4. Spesifikasi NKP-DC-S10B.....	52
Tabel 2. 5. Spesifikasi load cell	54
Tabel 2. 6. Spesifikasi Motor 555.....	60
Tabel 2. 7. spesifikasi Mosfet IRLZ44N	66
Tabel 2. 8. Spesifikasi LCD TFT.....	68
Tabel 3. 1. keterangan hardware 3D.....	85
Tabel 3. 2. Dimensi Kerangka Alat.....	91
Tabel 3. 3. Spesifikasi tabung penyimpanan warna.....	99
Tabel 3. 4. Spesifikasi mixing tank.....	99
Tabel 3. 5. Spesifikasi Motor Pengaduk	100
Tabel 3. 6. Spesifikasi sensor utama.....	100
Tabel 3. 7. Spesifikasi Kontrol	101
Tabel 3. 8. Keterangan arus	118
Tabel 3. 9. Data RAW untuk faktor kalibrasi	122
Tabel 3. 10. Hasil Kalibrasi Touchscreen	126
Tabel 3. 11. Hasil Perhitungan Torsi Motor DC	130
Tabel 3. 12. Potongan program database nama warna dan komposisi cat.....	131
Tabel 3. 13. Program Perhitungan Target Massa Komponen	133
Tabel 3. 14. Program Pemrosesan Pilihan Warna pada Touchscreen	133
Tabel 3. 15. Potongan program pengendalian aktivasi pompa pada Sequential Control	134
Tabel 3. 16. Program PWM CEPAT DAN PRESISI	135
Tabel 3. 17. Potongan program pengendalian Two-stage Dosing berdasarkan massa aktual.....	136
Tabel 3. 18. Potongan program parameter Δm threshold dan kompensasi penghentian pompa.....	137

Tabel 3. 19. Potongan program penentuan target dan batas Gravimetric Dosing	138
Tabel 3. 20. potongan program pembacaan massa aktual pada tangki pencampuran	138
Tabel 3. 21. Potongan program pengendalian pompa berdasarkan batas massa	139
Tabel 3. 22. Potongan program pengaktifan dan penghentian motor pengaduk	140
Tabel 3. 23. Potongan program pengaturan waktu proses mixing.....	141
Tabel 3. 24. Potongan program pengiriman pesan READY kepada raspberry Pi	142
Tabel 3. 25. Potongan program penerimaan data USB Serial dari raspberry Pi.....	143
Tabel 3. 26. Potongan program pemrosesan respons KOREKSI dan WARNA_SESUAI	144
Tabel 3. 27. Potongan program penentuan target dosing koreksi warna	146
Tabel 3. 28. Potongan program pelaksanaan dosing koreksi secara sequential	147
Tabel 3. 29. Potongan program arduino mengirimkan pesan READY dengan tahap MIXING_KOREKSI.....	148
Tabel 3. 30. Database Komposisi Pencampuran warna.....	149
Tabel 4. 1. Hasil Kalibrasi 10 kg	161
Tabel 4. 2. Hasil 5 percobaan load cell.....	165
Tabel 4. 3. Analisis Akurasi load cell 10 kg	165
Tabel 4. 4. Analisis Presisi load cell 10 kg	168
Tabel 4. 5. Kondisi motor terhadap PWM.....	171
Tabel 4. 6. Hasil Pengujian debit pompa	172
Tabel 4. 7. Persentase Rentang Relatif	174
Tabel 4. 8. Rekapitulasi Overshoot Awal Pompa pada PWM 255 dan PWM 120 ...	180
Tabel 4. 9. Penentuan Waktu Delay dan $\Delta m_{threshold}$	181
Tabel 4. 10. Parameter Final Two-stage Dosing.....	183
Tabel 4. 11. Tabel Validasi massa 50g	184
Tabel 4. 12. Hasil Validasi Massa Gravimetric Two-stage Dosing pada Target 50 g	185
Tabel 4. 13. Pengujian waktu tahap preisi dan waktu total	186
Tabel 4. 14. Hasil pengujian waktu mixing dengan variasi massa	187

Tabel 4. 15. Dokumentasi waktu mixing.....	188
Tabel 4. 16. Pengujian Pengiriman Data READY dari arduino ke raspberry Pi	192
Tabel 4. 17. Data Penerimaan Warna koreksi	194
Tabel 4. 18. Pengujian Penerimaan Data KOREKSI dari raspberry Pi pada arduino	194
Tabel 4. 19. Keterangan Hasil Warna Pencampuran	200
Tabel 4. 20. Dokumentasi Hasil Pencampuran.....	201
Tabel 4. 21. Pengujian tegangan sumber 12 VDC.....	204
Tabel 4. 22. pengujian tegangan step-down 5 VDC	206
Tabel 4. 23. Hasil Pengujian Gate-Source MOSFET dan Output Pompa	208
Tabel 4. 24. Dokumentasi Pengujian Gate-Source MOSFET dan Output Pompa ...	209
Tabel 4. 25. pengujian relay.....	215

INTISARI

Rancang Bangun Sistem Pencampuran Cat Otomatis Menggunakan Pompa Peristaltik Dengan Metode *Sequential Control*, PWM Control, dan *Gravimetric Dosing*

Muhammad Daffa Raihan

Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro

Proses pencampuran cat secara manual masih berpotensi menghasilkan komposisi warna yang tidak konsisten karena penakaran bahan sulit dikendalikan secara presisi. Penelitian ini bertujuan merancang dan merealisasikan sistem pencampuran cat otomatis berbasis mikrokontroler dengan mengintegrasikan metode *Sequential Control*, *PWM Two-stage Dosing*, dan *Gravimetric Dosing*. Sistem menggunakan Arduino Mega Pro Mini sebagai pengendali utama, lima pompa peristaltik, load cell 10 kg yang dihubungkan dengan modul HX711, serta raspberry Pi untuk analisis warna berbasis HSV melalui komunikasi USB Serial.

Hasil kalibrasi load cell menunjukkan akurasi yang sangat tinggi dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,999999884, rata-rata error 0,016%, dan error maksimum 0,03% pada rentang pengujian 1.000–7.000 gram. Pengujian debit menunjukkan bahwa peningkatan nilai PWM berbanding lurus dengan debit keluaran pompa, dengan debit tertinggi sebesar 2,09 gram/detik dan terendah 1,30 gram/detik, sementara seluruh pompa memiliki nilai rentang relatif (RR) di bawah 5%. Validasi metode *Two-stage Dosing* pada target 50 gram menghasilkan rata-rata error sebesar 0,157–0,285% dengan koefisien variasi di bawah 0,3%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi ketiga metode kendali mampu meningkatkan akurasi, konsistensi, dan keandalan sistem pencampuran cat otomatis, dengan error penakaran akhir yang konsisten di bawah 0,3%.

Kata Kunci: pencampuran cat otomatis, *Sequential Control*, *PWM Control*, *Gravimetric Dosing*, pompa peristaltik, load cell.

ABSTRACT

Design and Development of an Automatic Paint Mixing System Using Peristaltic Pumps with Sequential Control, PWM Control, and Gravimetric Dosing Methods

Muhammad Daffa Raihan

Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro

Manual paint mixing often produces inconsistent color compositions because ingredient dosing is difficult to control precisely. This study designs and implements a microcontroller-based automatic paint mixing system by integrating Sequential Control, PWM Two-stage Dosing, and Gravimetric Dosing. The system employs an Arduino Mega Pro Mini as the main controller, five peristaltic pumps, a 10 kg load cell interfaced through an HX711 module, and a raspberry Pi for HSV-based color analysis via USB Serial communication.

Load cell calibration demonstrated excellent accuracy with a coefficient of determination (R^2) of 0.999999884, an average error of 0.016%, and a maximum error of 0.03% over the 1,000–7,000 gram measurement range. Flow rate testing confirmed that higher PWM values increased the pump flow rate, with the highest flow rate reaching 2.09 g/s and the lowest 1.30 g/s, while all pumps maintained relative range (RR) values below 5%. Validation of the Two-stage Dosing method at a 50-gram target resulted in average errors of 0.157–0.285% and coefficients of variation below 0.3%. These findings demonstrate that integrating the three control methods improves the accuracy, consistency, and reliability of the automatic paint mixing system, with final dosing errors consistently below 0.3%.

Kata Kunci: automatic paint mixing, Sequential Control, PWM Control, Gravimetric Dosing, peristaltic pump, load cell.

DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

Singkatan	Keterangan	Deskripsi
AC	Alternating Current	Jenis arus listrik bolak-balik yang umum digunakan pada sumber listrik rumah tangga.
ADC	Analog to Digital Converter	Komponen yang mengubah sinyal analog menjadi data digital agar dapat diproses mikrokontroler.
BLE	Bluetooth <i>LOW</i> Energy	Teknologi komunikasi nirkabel dengan konsumsi daya rendah.
BTS7960	Driver motor DC tipe H-Bridge	Modul driver motor yang digunakan untuk mengendalikan arah putaran dan kecepatan motor DC arus besar.
CMYK	Cyan, Magenta, Yel <i>LOW</i> , Key/Black	Model warna yang umum digunakan pada proses pencampuran dan percetakan warna.
CPU	Central Processing Unit	Unit pemroses utama pada sistem komputer atau mikrokontroler.
DC	Direct Current	Jenis arus listrik searah yang umum digunakan pada rangkaian elektronika dan motor DC.
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory	Memori yang dapat dihapus dan ditulis ulang untuk menyimpan data permanen.
GPIO	General Purpose Input Output	Pin masukan dan keluaran umum yang digunakan untuk menghubungkan sensor dan aktuator.
GPU	Graphics Processing Unit	Unit pemroses grafis yang digunakan untuk pengolahan tampilan visual.

HMI	Human Machine Interface	Antarmuka yang digunakan pengguna untuk berinteraksi dengan sistem atau mesin.
HSV	<i>Hue, Saturation, Value</i>	Model warna yang digunakan untuk analisis dan evaluasi warna secara digital.
HX711	Modul ADC dan penguat sinyal <i>load cell</i>	Modul yang digunakan untuk membaca sinyal kecil dari <i>load cell</i> agar dapat diproses oleh mikrokontroler.
LCD	Liquid Crystal Display	Media tampilan yang digunakan untuk menampilkan data, menu, dan status sistem.
LED	Light Emitting Diode	Komponen lampu indikator yang menghasilkan cahaya saat dialiri arus listrik.
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	Komponen semikonduktor yang digunakan sebagai saklar elektronik atau pengendali daya.
NC	Normally Closed	Kondisi kontak relay yang tertutup saat relay tidak aktif.
NO	Normally Open	Kondisi kontak relay yang terbuka saat relay tidak aktif.
PCB	Printed Circuit Board	Papan rangkaian yang digunakan untuk menghubungkan komponen elektronika.
PoE	Power over Ethernet	Teknologi yang memungkinkan daya listrik dan data dikirim melalui kabel Ethernet.
PWM	Pulse Width Modulation	Metode pengendalian daya dengan mengatur lebar pulsa sinyal digital.

RAM	Random Access Memory	Memori sementara yang digunakan untuk menyimpan data saat sistem berjalan.
RGB	Red, Green, Blue	Model warna berbasis cahaya yang digunakan pada tampilan digital.
RPM	Revolutions Per Minute	Satuan untuk menunjukkan jumlah putaran motor setiap menit.
SBC	Single Board Computer	Komputer lengkap dalam satu papan rangkaian, seperti raspberry Pi.
SD	Secure Digital	Media penyimpanan data berbentuk kartu memori.
SRAM	Static Random Access Memory	Jenis RAM yang digunakan untuk penyimpanan data sementara dengan kecepatan tinggi.
TFT	Thin Film Transistor	Teknologi layar LCD yang menggunakan transistor tipis untuk meningkatkan kualitas tampilan.
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter	Metode komunikasi serial antar perangkat elektronik.
VDC	Volt Direct Current	Satuan tegangan arus searah (DC) yang digunakan untuk menyatakan besar tegangan pada sistem elektronika dan rangkaian kendali.
USB Serial	Universal Serial Bus	Standar antarmuka komunikasi yang digunakan untuk menghubungkan perangkat elektronik serta mendukung pertukaran data dan catu daya.

USB Universal Serial Bus Antarmuka komunikasi dan catu daya yang umum digunakan pada perangkat elektronik.

VCC Tegangan suplai positif Jalur tegangan positif yang digunakan untuk memberi daya pada rangkaian elektronik.

Simbol	Definisi	Satuan
(V)	Tegangan listrik	Volt (V)
(I)	Arus listrik	Ampere (A)
(R)	Hambatan listrik	Ohm (Ω)
(P)	Daya listrik	Watt (W)
(f)	Frekuensi	Hertz (Hz)
(C)	Kapasitansi	Farad (F)
(L)	Induktansi	Henry (H)
(m)	Massa	Gram (g) atau kilogram (kg)
(m_i)	Massa awal	Gram (g)
(m_f)	Massa akhir	Gram (g)
(m_{target})	Massa target	Gram (g)
(m_{actual})	Massa aktual	Gram (g)
(Δm)	Perubahan massa	Gram (g)
($\dot{m}$)	Laju aliran massa	Gram per detik (g/s)
(t)	Waktu	Detik (s)
(t_i)	Waktu awal	Detik (s)
(t_f)	Waktu akhir	Detik (s)
(Δt)	Perubahan waktu	Detik (s)

(T)	Periode sinyal PWM	Detik (s)
(T_s)	Waktu sampling	Detik (s)
(t_{on})	Durasi sinyal aktif PWM	Detik (s)
(t_{off})	Waktu setelah pompa dimatikan	Detik (s)
(D)	Duty cycle PWM	Persen (%)
(Q)	Debit aliran	mL/s atau mL/min
(ρ)	Densitas fluida	g/mL atau kg/m ³
(n)	Kecepatan putar motor	RPM
(ω)	Kecepatan sudut	rad/s
(τ)	Torsi motor	Newton meter (N·m)
(η)	Efisiensi	Persen (%)
(e)	Error massa	Gram (g)
$(\%error)$	Persentase kesalahan	Persen (%)
(V_{in})	Tegangan masukan	Volt (V)
(V_{out})	Tegangan keluaran	Volt (V)
(V_{GS})	Tegangan gate-source MOSFET	Volt (V)
(V_{DS})	Tegangan drain-source MOSFET	Volt (V)
(I_D)	Arus drain MOSFET	Ampere (A)
$(R_{DS(on)})$	Resistansi drain-source saat aktif	Ohm (Ω)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Otomasi telah membawa perubahan yang cukup maju dalam sektor manufaktur modern. Otomasi merupakan penerapan sistem mekanik, elektronik, dan komputerisasi untuk mengubah proses produksi dari manual menjadi otomatis sehingga proses dapat berjalan lebih efisien, teknologi seperti mikroprosesor dan sistem kontrol otomatis dalam produksi dilakukan secara terkoordinasi, meningkatkan produktivitas serta kualitas hasil sebuah produk. Seiring berkembangnya Revolusi Industri 4.0, otomasi menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi, fleksibilitas, dan efektivitas proses produksi. Sistem otomatis memungkinkan proses berjalan dengan intervensi manusia yang minimal sekaligus mendukung pengolahan data untuk meningkatkan kinerja sistem [1].

Pada proses produksi cat, metode pencampuran yang masih dilakukan secara manual berpotensi menimbulkan tidak konsisten terhadap kualitas hasil produksi. Pencampuran warna yang tidak didukung sistem otomatis dapat menyebabkan perbedaan warna produk yang menjadi salah satu bentuk kecacatan mutu, sehingga kualitas cat yang dihasilkan tidak selalu memenuhi standar yang ditetapkan [2]. Ketergantungan terhadap operator dalam menentukan proporsi bahan dan teknik pencampuran juga meningkatkan risiko kesalahan. Selain itu, pencampuran manual memiliki keterbatasan dari segi efektivitas waktu, tenaga, dan tingkat homogenitas campuran. Hasil pencampuran yang dilakukan tanpa bantuan mesin cenderung kurang merata sehingga memengaruhi konsistensi dan kualitas hasil produksi, maka diperlukan sistem pencampuran yang lebih terkontrol dan otomatis untuk meningkatkan presisi komposisi, keseragaman campuran, serta keandalan proses produksi [3].

Penerapan teknologi otomasi dan sistem kontrol dalam proses pencampuran cairan memberikan solusi untuk meningkatkan akurasi dan konsistensi produksi. Penggunaan mikrokontroler yang terintegrasi dengan sensor dan aktuator memungkinkan proses pencampuran berjalan secara terkoordinasi dan terprogram, sehingga takaran bahan

dapat dikontrol dengan lebih tepat dan hasil campuran menjadi lebih homogen atau tercampur sempurna. Sistem pencampuran otomatis berbasis mikrokontroler juga dapat meningkatkan efisiensi produksi, mengurangi pemborosan bahan, serta meminimalkan kesalahan manusia dalam proses pencampuran [4].

Akurasi takaran dan pengendalian aliran bahan menjadi faktor penting dalam menjaga kualitas hasil pencampuran. Ketidaktepatan komposisi bahan dapat menyebabkan perbedaan warna dan menurunkan kualitas produk, sehingga diperlukan sistem pengendalian yang mampu mengatur pengeluaran bahan secara presisi dan konsisten. Pengendalian proses pencampuran yang terukur dapat menambah kualitas warna dan homogenitas campuran tetap terjaga serta membantu meminimalkan cacat produksi yang disebabkan oleh kesalahan metode pencampuran[2]. Selain itu, akurasi pengukuran dan pengendalian aliran merupakan faktor penting dalam sistem pencampuran presisi. Teknologi pengukuran massa dan aliran modern dirancang untuk menghasilkan tingkat kesalahan yang sangat kecil ketika sistem beroperasi [5].

Pendekatan teknologi dalam sistem kontrol modern menekankan pengendalian proses yang terstruktur dan berbasis data untuk meningkatkan kepastian serta efisiensi operasi. Strategi pengendalian berurutan (*Sequential Control*) dapat menjalankan proses secara sistematis sesuai tahapan yang telah ditentukan sehingga koordinasi antar proses dapat berlangsung lebih stabil [6]. Dalam sistem pengendalian aktuator dan fluida, pengaturan sinyal kendali seperti *Pulse Width Modulation* (PWM) digunakan untuk mengatur respons aktuator secara presisi dan efisien energi, sehingga laju aliran atau pergerakan fluida dapat dikendalikan secara fleksibel [7]. Untuk menjamin ketepatan komposisi dalam proses pencampuran, metode *Gravimetric Dosing* berbasis pengukuran massa memberikan tingkat akurasi tinggi karena sistem mampu memantau dan mengontrol jumlah bahan secara *realtime* dengan kesalahan yang minimal [5].

Berbagai penelitian telah mengembangkan sistem pencampuran cat otomatis berbasis mikrokontroler untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi ketergantungan pada proses manual. Sistem tersebut mampu mengotomatisasi proses pencampuran dan menjalankan tahapan kerja secara terstruktur, namun pengendalian yang digunakan umumnya masih bersifat dasar dan belum mengintegrasikan mekanisme kontrol presisi

terhadap debit aliran serta jumlah bahan secara *realtime* [7]. Beberapa rancangan sistem pencampuran cat telah berhasil menghasilkan warna mendekati nilai yang diinginkan, tetapi pengaturan volume bahan masih bergantung pada pengaturan waktu bukaan katup atau kalibrasi awal, sehingga akurasi pencampuran sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional dan masih memerlukan penyesuaian manual. Selain itu, meskipun penggunaan mikrokontroler dan sensor telah meningkatkan efisiensi proses, sistem yang ada umumnya belum mampu menjamin konsistensi komposisi secara berulang karena tidak menggunakan umpan balik massa maupun mekanisme koreksi otomatis terhadap hasil pencampuran [4].

Sebagai solusi terhadap permasalahan tidak konsisten pencampuran manual, pada penelitian ini mengintegrasikan kontrol sekuensial, pengaturan debit berbasis PWM, serta metode *Gravimetric Dosing* untuk memastikan ketepatan massa bahan secara *realtime*. Melalui penggunaan *load cell*, sistem dapat memantau jumlah bahan yang masuk secara langsung dan menghentikan proses pengisian tepat ketika massa target tercapai. Dengan pendekatan ini, akurasi komposisi tidak lagi bergantung pada durasi kerja pompa atau asumsi debit tetap, melainkan berdasarkan hasil pengukuran aktual sehingga kesalahan takaran dapat diminimalkan.

Selain pengendalian massa, sistem juga dilengkapi modul evaluasi warna berbasis pengolahan citra untuk memastikan kesesuaian hasil pencampuran dengan warna target. Modul evaluasi warna tersebut dikembangkan dalam penelitian terpisah oleh Johaness Sjarbel Annaya Kristanto, sedangkan penelitian ini berfokus pada sistem penakaran massa dan pengendalian proses pencampuran. Kedua subsistem diintegrasikan melalui komunikasi data sehingga apabila terjadi penyimpangan warna, sistem dapat menerima nilai koreksi dan menambahkan bahan secara otomatis hingga warna sesuai dengan parameter yang ditetapkan. Integrasi tersebut membentuk sistem kontrol tertutup yang tidak hanya presisi dalam takaran massa, tetapi juga mampu menjaga konsistensi warna dan kualitas produk secara keseluruhan.

1.2. Perumusan masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, terdapat beberapa permasalahan yang perlu dikaji dalam Rancang Bangun pencampuran warna cat otomatis sebagai berikut :

- a. Bagaimana merancang dan membangun sistem pencampuran warna cat otomatis berbasis cairan dengan memanfaatkan warna warna dasar (Biru, Hitam, Kuning, Putih, Merah) sebagai sumber utama pencampuran?
- b. Bagaimana merancang sistem pencampuran warna cat otomatis yang bekerja berdasarkan urutan proses menggunakan metode *Sequential Control*?
- c. Bagaimana mengendalikan debit aliran cat menggunakan pengaturan kecepatan motor pompa berbasis PWM untuk memperoleh massa pencampuran yang akurat?
- d. Bagaimana menerapkan metode *Gravimetric Dosing* berbasis *load cell* yang dipadukan dengan *Two-stage Dosing* untuk meningkatkan akurasi penakaran cairan pada sistem pencampuran cat otomatis?
- e. Bagaimana hasil implementasi metode *Sequential Control*, PWM *Two-stage Dosing*, dan *Gravimetric Dosing* terhadap akurasi sistem pencampuran cat otomatis

1.3. Tujuan Tugas Akhir

Sejalan dengan permasalahan yang telah dirumuskan, tujuan dari Tugas Akhir ini adalah merancang dan merealisasikan sistem pencampuran warna cat otomatis yang mampu bekerja secara terstruktur selain itu sebagai berikut :

- a. Merancang dan membangun sistem pencampuran warna cat otomatis berbasis cairan dengan memanfaatkan warna dasar (Biru, Hitam, Kuning, Putih, Merah) sebagai sumber utama pencampuran.
- b. Menerapkan metode *Sequential Control* untuk mengatur urutan proses pencampuran agar pengeluaran cairan berlangsung sistematis dan sesuai komposisi yang ditentukan.
- c. Mengendalikan debit aliran cat melalui pengaturan kecepatan motor pompa berbasis PWM guna memperoleh massa pencampuran yang akurat.
- d. Mengimplementasikan metode *gravimetric* berbasis sensor berat untuk menentukan jumlah cairan yang dikeluarkan secara tepat berdasarkan pengukuran massa.
- e. Mengevaluasi kinerja sistem hasil integrasi metode *Sequential Control*, PWM *Two-stage Dosing*, dan *Gravimetric Dosing* berdasarkan akurasi penakaran cairan.

1.4. Manfaat Tugas Akhir

- a. Menghasilkan sistem pencampuran warna cat otomatis yang mampu meningkatkan konsistensi dan presisi komposisi warna dibandingkan metode manual.
- b. Memberikan alternatif solusi teknologi yang dapat diimplementasikan pada industri kecil dan menengah yang memerlukan sistem pencampuran warna yang efisien dan akurat
- c. Membantu dalam mengurangi kesalahan manusia (*human error*) dalam menentukan komposisi pencampuran cairan

1.5. Pembatasan Masalah

- a. Sistem hanya menggunakan lima warna dasar (Biru, Hitam, Kuning, Putih, dan Merah) dan menghasilkan beberapa pencampuran warna tidak mencakup seluruh spektrum warna.
- b. Sistem tidak melakukan konversi otomatis massa(gr) ke volume(ml) karena perbedaan densitas cairan dapat memengaruhi akurasi.
- c. Cat diencerkan dengan air sebanyak 15% dan perbandingan pengenceran dijaga konstan selama pengujian untuk mempertahankan viskositas dan kestabilan aliran.
- d. Pengaturan debit aliran cat dilakukan melalui pengendalian kecepatan motor pompa menggunakan metode PWM (*open-loop*) tanpa menggunakan sensor kecepatan motor.
- e. Sistem tidak membahas formulasi kimia cat dan Pengadukan campuran dilakukan menggunakan motor mixer untuk memperoleh homogenitas warna tanpa analisis dinamika fluida secara mendalam.
- f. Evaluasi warna menggunakan metode HSV dilakukan oleh subsistem terpisah, sedangkan penelitian ini berfokus pada eksekusi pencampuran dan penambahan koreksi warna.
- g. Sistem tidak dilengkapi dengan fitur pembersihan otomatis (*auto-cleaning*) pada jalur aliran dan tabung cairan.

1.6. Sistematika Laporan Tugas Akhir

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas latar belakang yang mendasari Rancang Bangun sistem pencampuran cat otomatis, khususnya kebutuhan terhadap proses penakaran dan

pencampuran warna yang akurat, konsisten, serta dapat dikendalikan secara otomatis. Bab ini juga memuat rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan batasan masalah agar pelaksanaan penelitian tetap sesuai dengan ruang lingkup yang telah ditentukan.

BAB II DASAR TEORI

Bab ini menguraikan teori-teori yang mendukung perancangan dan pengujian sistem pencampuran cat otomatis. Pembahasan meliputi prinsip pencampuran warna, karakteristik cat sebagai fluida, pompa peristaltik, pengendalian menggunakan Pulse Width Modulation (PWM), *Sequential Control*, *Gravimetric Dosing* berbasis *load cell*, *Two-stage Dosing*, overshoot, sisa aliran, dan metode perataan pembacaan sensor.

Bab ini juga membahas perangkat yang digunakan dalam sistem, antara lain arduino mega pro mini 2560, raspberry Pi, modul HX711, *load cell*, LCD TFT *Touchscreen*, motor pengaduk, driver BTS7960, MOSFET, solenoid valve, relay, dan komponen pendukung lainnya. Selain itu, dijelaskan konsep pengolahan warna menggunakan HSV serta komunikasi USB Serial antara arduino dan raspberry Pi.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tahapan perancangan dan pembangunan sistem pencampuran cat otomatis secara menyeluruh. Pembahasan mencakup diagram blok sistem, perancangan mekanik, perancangan elektrik, pemetaan pin, desain *Mixing tank*, penempatan *load cell*, sistem pompa peristaltik, motor pengaduk, solenoid valve, serta antarmuka LCD TFT *Touchscreen*.

Pada bagian perangkat lunak, dijelaskan perancangan database komposisi warna, pemilihan warna melalui LCD TFT, *Sequential Control* untuk mengatur urutan kerja pompa, pengendalian PWM dua tahap, *Gravimetric Dosing* berdasarkan pembacaan massa, pengendalian motor pengaduk, dan proses pengeluaran hasil campuran.

Bab ini juga menguraikan komunikasi USB Serial antara arduino dan raspberry Pi. Selain perancangan, bab ini menjelaskan metode pengujian yang digunakan untuk mengevaluasi kalibrasi dan akurasi *load cell*, debit dan konsistensi pompa peristaltik, perpindahan PWM, overshoot, waktu delay, gravimetric *Two-stage Dosing*, *Sequential*

Control, sistem pengaduk, komunikasi USB Serial, output cat, dan pengujian sistem secara keseluruhan.

BAB IV HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil realisasi perangkat keras dan perangkat lunak sistem pencampuran cat otomatis. Hasil realisasi perangkat lunak meliputi program pemilihan warna dan komposisi cat, tampilan LCD TFT, *Sequential Control*, PWM control, *Gravimetric Dosing* berbasis *load cell*, pengendalian motor pengaduk, komunikasi arduino dan raspberry Pi, serta pengendalian output cat berdasarkan massa.

Bab ini juga menyajikan hasil pengujian kalibrasi, linearitas, akurasi, dan presisi *load cell*. Pengujian pompa peristaltik meliputi debit masing-masing pompa pada PWM 120 dan PWM 255, konsistensi keluaran, overshoot, sisa aliran, waktu delay, batas switch, batas stop, serta validasi gravimetric *Two-stage Dosing*.

Pengujian *Sequential Control* dilakukan untuk memastikan pompa aktif satu per satu sesuai komposisi warna. Pengujian sistem pengaduk dilakukan untuk mengetahui waktu yang diperlukan agar campuran menjadi homogen. Pengujian komunikasi USB Serial membahas keberhasilan pengiriman pesan *READY*, penerimaan pesan KOREKSI, eksekusi massa koreksi oleh pompa, dan penerimaan pesan WARNA_SESUAL.

Selanjutnya, dilakukan pembahasan hasil analisis HSV, penentuan massa koreksi warna, pengaktifan kembali pompa koreksi, mixing ulang, serta proses pengeluaran cat sebanyak 300 g menggunakan *load cell* output dan solenoid valve. Hasil pengujian elektrikal dan pengujian sistem secara keseluruhan juga dianalisis untuk menilai kesesuaian fungsi alat terhadap tujuan penelitian.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil perancangan, realisasi, pengujian, dan pembahasan sistem pencampuran cat otomatis. Kesimpulan disusun untuk menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian yang telah ditetapkan.

Bab ini juga berisi saran pengembangan yang dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja sistem pada penelitian berikutnya, seperti peningkatan akurasi penakaran massa kecil, pengembangan metode koreksi warna, peningkatan homogenitas pencampuran,

penyempurnaan mekanisme output, serta pengembangan antarmuka dan sistem pengawasan alat.

DAFTAR PUSTAKA

Daftar pustaka memuat seluruh sumber referensi yang digunakan dalam penyusunan laporan Tugas Akhir, baik berupa jurnal, buku, datasheet, standar, prosiding, maupun sumber ilmiah lainnya.

LAMPIRAN

Lampiran memuat dokumen pendukung penelitian, seperti program arduino, tabel data pengujian, dokumentasi alat, hasil komunikasi serial, serta dokumen lain yang mendukung isi laporan.

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Setelah meninjau berbagai sumber pustaka, baik dari jurnal ilmiah maupun hasil penelitian sebelumnya, diperoleh sejumlah penelitian yang relevan dan telah dilakukan terkait sistem pencampuran cairan dan otomasi proses industri. Ringkasan penelitian-penelitian terdahulu yang menjadi acuan dan pembanding dalam tugas akhir ini disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1. Tinjauan Pustaka

NO	Peneliti & Judul	Keterangan	Perbaikan / Keterbatasan
1	Try Andio Rahmandika & Fivia Eliza (2022) <i>“Perancangan Sistem Pencampuran Cat Berbasis Mikrokontroler — JTEIN”</i>	Penelitian ini merancang sistem pencampuran cat otomatis berbasis mikrokontroler arduino Uno (ATmega328) untuk menggabungkan warna dasar CMYK menjadi berbagai variasi warna. Keluaran cat diatur menggunakan motor servo yang berfungsi sebagai katup, sedangkan motor DC digunakan sebagai pengaduk untuk menghasilkan campuran yang homogen. Sistem dikendalikan melalui antarmuka Visual Basic pada computer yang dapat dilakukan dengan memilih warna dan menentukan	Pengaturan volume cat masih menggunakan metode berbasis waktu (delay buka dan tutup katup), sehingga akurasi takaran dapat dipengaruhi oleh variasi debit aliran dan karakteristik fluida. Sistem juga belum menggunakan umpan balik massa atau sensor berat untuk menjamin ketepatan komposisi campuran dan pengendalian aliran belum menerapkan kontrol kecepatan pompa atau mekanisme dosing presisi yang cukup baik terhadap

		komposisi campuran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan warna yang mendekati nilai <i>set point</i> serta mengeluarkan volume cat sesuai pengaturan program dengan metode pengaturan waktu bukaan katup [8].	perubahan kondisi operasional.
2	Haji Wijaya & Sulaiman (2025) <i>“Rancang Bangun Alat Pencampuran Cat Air 3 Warna Dasar Berbasis Mikrokontroler”</i>	Penelitian ini merancang alat pencampuran cat air otomatis berbasis mikrokontroler dengan integrasi arduino Nano sebagai pengendali utama dan NodeMCU ESP8266 untuk konektivitas dan pengendalian melalui aplikasi Android. Sistem menggunakan sensor warna TCS3200 untuk mendeteksi hasil warna campuran serta sensor ultrasonik untuk mendeteksi ketersediaan cairan. Motor servo berfungsi sebagai katup pengatur aliran cat, sedangkan motor DC	Pengaturan komposisi campuran masih berdasarkan persentase yang telah diprogram dan tidak menggunakan sistem pengukuran massa atau umpan balik berat untuk menjamin ketepatan takaran bahan. Kontrol aliran cairan juga belum menerapkan pengaturan debit yang tergantung terhadap perubahan kondisi fluida. Selain itu, meskipun sensor warna digunakan untuk mendeteksi hasil campuran, sistem belum mengimplementasikan mekanisme koreksi

		digunakan sebagai pengaduk untuk menghasilkan campuran yang homogen. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat mampu mencampurkan tiga warna dasar (merah, kuning, biru) menjadi berbagai warna sekunder dan tersier dengan volume campuran yang konsisten [4].	otomatis untuk menyesuaikan komposisi warna ketika terjadi deviasi dari warna target.
3	Dr. S. S. Khedkar et al. (2020) “Study of Liquid Dispensing and Mixing in Fluid Handling Systems – A Review Article”	Jurnal ini mengkaji berbagai metode dispensing, metering, dan mixing fluida dalam sistem penanganan cairan otomatis untuk meningkatkan akurasi, efisiensi waktu, dan mengurangi pengaruh manusia. Otomasi berbasis mikrokontroler dan arduino banyak digunakan untuk mengontrol pompa, katup, sensor, dan pengaduk sehingga proses pengeluaran dan pencampuran cairan dapat dilakukan secara presisi dan konsisten. Studi ini juga menyoroti	Jurnal ini bersifat tinjauan literatur sehingga tidak menyajikan implementasi sistem prototipe yang diuji secara langsung. Selain itu, sistem yang dikaji umumnya masih memisahkan fungsi metering dan mixing, serta belum menekankan penggunaan umpan balik massa untuk meningkatkan akurasi takaran.

		penggunaan solenoid valve sebagai komponen utama pengontrol aliran serta pompa peristaltik sebagai solusi efektif untuk memompa cairan dengan berbagai viskositas [9].	
4	Hari Bangun & Agus Ulinuha (2025) “Rancang Bangun Alat Pencampur Desinfektan Otomatis”	Penelitian merancang sistem pencampuran cairan otomatis menggunakan mikrokontroler arduino Nano, sensor <i>flow</i> meter untuk mengukur debit dan volume cairan, solenoid valve sebagai pengatur aliran, serta motor DC sebagai pengaduk. Sistem mampu mencampur larutan hingga kapasitas 5 liter dengan komposisi yang telah ditentukan dan menampilkan hasil pengukuran pada LCD [10].	Pengukuran berbasis <i>flow</i> meter masih menghasilkan error 0,21–1,8% dan selisih volume hingga 100–170 mL. Akurasi dipengaruhi ketidakstabilan aliran dan sisa cairan dalam pipa setelah katup tertutup. Sistem belum menggunakan umpan balik massa (<i>gravimetric</i>), kontrol debit adaptif, maupun mekanisme koreksi otomatis untuk meningkatkan presisi komposisi
5	Santamaría Alvarez, F.N. et al. (2024) <i>Influence of Refilling on Dosing</i>	Penelitian ini membahas sistem dosing <i>gravimetric</i> (loss-in-weight feeder) yang digunakan pada proses manufaktur kontinu untuk memastikan akurasi laju	Penelitian ini membahas sistem dosing <i>gravimetric</i> (loss-in-weight feeder) yang digunakan pada proses manufaktur kontinu untuk memastikan akurasi

	<i>Accuracy of Loss-in-Weight Powder Feeders in Continuous Manufacturing</i>	aliran material. Sistem bekerja dengan mengukur perubahan massa terhadap waktu menggunakan <i>load cell</i> sehingga laju aliran material dapat dikontrol secara <i>realtime</i> melalui mekanisme umpan balik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mode <i>gravimetric</i> memberikan akurasi lebih tinggi dibanding mode volumetrik karena tidak dipengaruhi perubahan densitas material. Selain itu, waktu pengisian ulang (refilling), jenis mekanisme pengisian, dan level material dalam hopper berpengaruh signifikan terhadap deviasi laju dosis[11].	laju aliran material. Sistem bekerja dengan mengukur perubahan massa terhadap waktu menggunakan <i>load cell</i> sehingga laju aliran material dapat dikontrol secara <i>realtime</i> melalui mekanisme umpan balik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mode <i>gravimetric</i> memberikan akurasi lebih tinggi dibanding mode volumetrik karena tidak dipengaruhi perubahan densitas material. Selain itu, waktu pengisian ulang (refilling), jenis mekanisme pengisian, dan level material dalam hopper berpengaruh signifikan terhadap deviasi laju dosis.
--	--	---	--

2.2. Sistem Pencampuran Cairan

Sistem pencampuran cairan merupakan proses penggabungan dua atau lebih komponen fluida untuk menghasilkan campuran yang homogen dengan komposisi yang sudah sesuai dengan standar. Dalam konteks industri dan produksi skala kecil, proses pencampuran yang dilakukan secara manual sering menghasilkan hasil yang kurang presisi akibat ketidakakuratan penakaran dan variasi teknik pencampuran.

Maka, penerapan sistem pencampuran otomatis menjadi solusi untuk meningkatkan konsistensi hasil, efisiensi proses, serta kualitas produk akhir.

Perkembangan teknologi otomasi dapat menjadi solusi untuk proses pencampuran cairan dilakukan secara terkontrol menggunakan sensor, aktuator, dan mikrokontroler. Sistem pencampuran otomatis bekerja dengan mengatur aliran cairan, mengukur jumlah fluida yang masuk ke wadah pencampuran, serta mengendalikan proses pencampuran berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Penggunaan sensor aliran atau metode pengukuran lainnya. Volume cairan dapat dikonversi ke satuan tertentu sehingga sistem akan mencapai komposisi campuran yang diinginkan secara lebih akurat dan dapat berulang [12].

2.3. Metode Pengendalian yang Digunakan

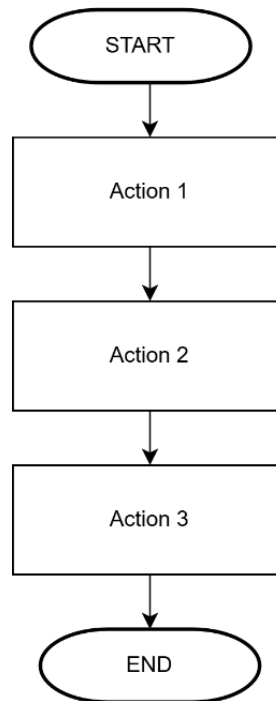
2.3.1. *Sequential Control*

Sequential Control merupakan metode pengendalian yang mengatur operasi sistem berdasarkan urutan langkah yang telah ditentukan. Dalam sistem otomatis, setiap proses dijalankan secara bertahap sesuai kondisi atau sinyal tertentu sehingga tahapan berikutnya hanya akan berlangsung setelah tahap sebelumnya selesai. Pendekatan ini banyak digunakan pada sistem otomasi berbasis mikrokontroler karena mampu mengoordinasikan kerja beberapa komponen secara sistematis dan terstruktur.

Pada sistem otomatis berbasis arduino, pengendalian berurutan memungkinkan perangkat menjalankan operasi secara logis sesuai alur proses yang telah diprogram. Sebagai contoh, pada sistem pengisian air otomatis, pompa diaktifkan setelah wadah terdeteksi siap dan berhenti ketika volume yang diinginkan tercapai [13].

Sequential Control bekerja dengan memanfaatkan logika kondisi (conditional logic) dan status proses. Setiap tahap memiliki kondisi pemicu (trigger condition) seperti sinyal sensor, waktu, atau status sistem. Ketika kondisi terpenuhi, sistem berpindah ke tahap berikutnya. Pendekatan ini meningkatkan keandalan operasi karena mencegah terjadinya konflik proses dan memastikan setiap langkah berjalan sesuai urutan yang benar. Dalam sistem kontrol modern, strategi pengendalian dipilih berdasarkan kebutuhan operasi dan karakteristik sistem agar performa dan efisiensi tetap optimal. Pengendalian berurutan menjadi salah satu pendekatan yang efektif karena sederhana,

mudah diimplementasikan, serta sesuai untuk sistem dengan tahapan proses yang jelas [14]. Prinsip kerja metode ini secara umum digambarkan melalui diagram alir pada Gambar 2.1 berikut.



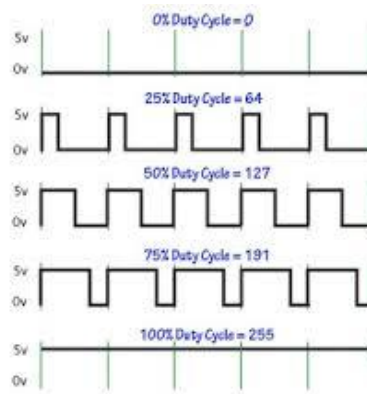
Gambar 2. 1. *Flowchart cara kerja Sequential Control*
(Dokumentasi Penulis)

Berdasarkan Gambar 2.1, metode Sequential Control bekerja secara berurutan sesuai urutan proses yang telah ditentukan. Pada sistem pencampuran cat otomatis, *Sequential Control* diterapkan untuk mengatur pengeluaran warna secara berurutan sesuai resep pencampuran. Setiap pompa diaktifkan satu per satu hingga berat target tercapai sebelum sistem beralih ke warna berikutnya. Setelah seluruh warna selesai ditambahkan, sistem melanjutkan ke tahap mixing. Pendekatan ini memastikan tidak terjadi pengeluaran bahan secara bersamaan, menjaga akurasi komposisi, serta meningkatkan konsistensi hasil pencampuran.

2.3.2. PWM (*Pulse Width Modulation*)

2.3.2.1. Gambaran umum

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan metode pengendalian daya yang dilakukan dengan memvariasikan lebar pulsa sinyal digital dalam satu periode tetap. Teknik ini mengatur perbandingan waktu sinyal berada pada kondisi aktif (*HIGH*) dan tidak aktif (*LOW*), yang dikenal sebagai *duty cycle*. Perbedaan duty cycle menghasilkan perubahan tegangan rata-rata yang diterima beban sehingga daya dapat dikontrol tanpa mengubah sumber tegangan [15]. Bentuk sinyal yang dihasilkan oleh metode PWM ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2. Bentuk gelombang PWM [16]

Berdasarkan Gambar 2.2, perubahan duty cycle menentukan besar tegangan rata-rata yang diterima beban, PWM banyak digunakan pada sistem kendali berbasis mikrokontroler karena mendapatkan keluaran analog dari sinyal digital. Dengan mengubah duty cycle, mikrokontroler dapat mengatur kecepatan motor DC, mengontrol aktuator, serta mengatur daya listrik secara efisien. Dibandingkan metode pengaturan tegangan linier, PWM memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi karena transistor saklar bekerja pada kondisi penuh hidup atau mati, sehingga rugi daya menjadi minimal

Secara prinsip, duty cycle dinyatakan dalam persentase yang menunjukkan lamanya sinyal berada pada kondisi aktif dalam satu periode. Duty cycle 0% berarti tidak ada energi yang diberikan, sedangkan 100% berarti beban menerima daya maksimum. Tegangan rata-rata keluaran berbanding lurus dengan duty cycle terhadap

tegangan sumber, sehingga perubahan duty cycle secara langsung memengaruhi energi yang diterima beban [17]

Selain efisiensi energi, PWM juga memberikan respons pengendalian yang cepat dan stabil, sehingga banyak diterapkan pada sistem penggerak motor dan pengaturan kecepatan aktuator. Pengaturan lebar pulsa memungkinkan sistem mencapai kontrol yang halus dan presisi terhadap perubahan beban dan kondisi operasi.

Secara matematis, duty cycle PWM dinyatakan sebagai:

$$D = \frac{t_{on}}{T_{tot}} \times 100\% \quad (2.1)$$

Keterangan:

- t_{ON} = durasi sinyal aktif
- T = periode sinyal

Tegangan rata-rata keluaran yang diterima Beban :

$$V_{avg} = D \times V_{in} \quad (2.2)$$

Pada mikrokontroler arduino dengan resolusi PWM 8-bit, nilai PWM direpresentasikan dari 0–255:

$$PWM_{value} = \frac{D}{100} \times 255 \quad (2.3)$$

Secara teori, tegangan rata-rata sinyal PWM dapat dihitung berdasarkan perkalian antara duty cycle dan tegangan sumber. Namun, hasil pengukuran menggunakan multimeter tidak selalu sama dengan nilai teori tersebut. Hal ini disebabkan karena sinyal PWM bukan tegangan DC murni, melainkan sinyal pulsa ON–OFF. Keysight menjelaskan bahwa bentuk gelombang input dapat memengaruhi akurasi pembacaan multimeter, terutama pada gelombang pulsa atau non-sinusoidal [18].

2.3.2.2. Persentase Rentang Relatif Keluaran Pompa

Persentase rentang relatif atau *relative range* merupakan salah satu parameter statistik yang dapat digunakan untuk mengetahui tingkat penyebaran hasil pengukuran berulang terhadap nilai rata-ratanya. Parameter ini dihitung dari selisih antara nilai maksimum dan nilai minimum, kemudian dibandingkan dengan nilai rata-rata seluruh hasil pengukuran. Hafner dkk. menggunakan *relative range* untuk mengevaluasi

reproduktibilitas hasil pengukuran dengan menyatakan selisih nilai maksimum dan minimum sebagai persentase terhadap nilai rata-rata. Pendekatan serupa juga digunakan oleh Jeon dkk. untuk mengevaluasi kestabilan suatu hasil pengujian, dengan nilai rentang relatif yang lebih kecil menunjukkan hasil yang lebih konsisten.

$$RR = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\bar{X}} \times 100\% \quad (2.4)$$

adalah persentase rentang relatif (%), $X_{\max}$ adalah nilai pengukuran maksimum, $X_{\min}$ adalah nilai pengukuran minimum, dan $\bar{X}$ adalah nilai rata-rata hasil pengukuran. Pada penelitian ini, parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi konsistensi massa cat yang dikeluarkan pompa dari tiga kali pengujian pada PWM 120 dan PWM 255. Semakin kecil nilai persentase rentang relatif, semakin kecil penyebaran hasil pengukuran dan semakin konsisten keluaran pompa.

2.3.3. *Gravimetric Dosing*

Weight-based control atau *gravimetric* control merupakan metode pengendalian jumlah material yang didasarkan pada pengukuran massa aktual sebagai parameter utama pengendalian. Pendekatan ini digunakan secara luas dalam proses industri dan analisis kuantitatif karena Pengendalian berbasis massa tidak memerlukan konversi densitas sebagaimana metode volumetrik dan tidak sepenuhnya bergantung pada kestabilan debit. Meskipun demikian, akurasi pembacaan massa tetap dapat dipengaruhi oleh kondisi mekanis, temperatur sensor, getaran, pemasangan *load cell*, dan pengolahan data.

Metode gravimetri dalam analisis kuantitatif dilakukan dengan mengisolasi suatu komponen dan menentukan jumlahnya melalui proses penimbangan hingga diperoleh massa yang stabil. Prinsip ini menunjukkan bahwa kuantitas material dapat ditentukan secara akurat melalui pengukuran berat residu yang dihasilkan. Konversi material ke bentuk yang dapat ditimbang menjadi dasar penting dalam memperoleh hasil analisis yang presisi.

Selain itu, dalam metode gravimetri, proses pengukuran dilakukan hingga mencapai bobot konstan, yang menandakan bahwa perubahan massa tidak lagi terjadi dan hasil penimbangan telah stabil. Massa konstan menunjukkan bahwa proses

pemisahan atau reaksi telah selesai sehingga nilai yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar perhitungan kuantitatif. Stabilitas massa ini menjadi indikator penting dalam memastikan ketepatan pada hasil pengukuran. Penggunaan metode gravimetri juga menekankan bahwa pengukuran berbasis massa memberikan tingkat ketelitian tinggi karena tidak memerlukan standar pembanding yang kompleks dan bergantung pada akurasi sistem penimbangan. Pendekatan ini banyak digunakan untuk menentukan kandungan zat atau komposisi material secara presisi melalui proses pengendapan, pengeringan, dan penimbangan hasil akhir [19].

Dalam sistem *gravimetric, load cell* digunakan untuk mengubah gaya berat menjadi sinyal listrik melalui deformasi strain gauge. Sinyal tersebut diperkuat dan diproses oleh mikrokontroler untuk menentukan massa aktual, kemudian dibandingkan dengan nilai target. Ketika massa mendekati target, sistem dapat mengurangi laju aliran atau menghentikan aktuator untuk mencegah kelebihan pengisian. Karena keputusan pengendalian didasarkan pada umpan balik hasil pengukuran, metode ini termasuk sistem *closed-loop control* yang mampu menjaga akurasi dan *repeatability* proses.

a. Laju pengisian massa

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2.5)$$

di mana:

- $\dot{m}$ = laju pengisian massa (g/s)
- Δm = perubahan massa (g)
- Δt = selang waktu pengisian (s)
- Perubahan massa dapat dihitung dari selisih antara massa akhir dan massa awal.

$$\Delta m = m_{akhir} - m_{awal} \quad (2.6)$$

- Sedangkan perubahan waktu diperoleh dari selisih waktu akhir dan waktu awal.

$$\Delta t = t_{akhir} - t_{awal} \quad (2.7)$$

b. Error pengisian

$$e_m = m_{target} - m_{actual} \quad (2.8)$$

c. Persentase error

$$error(\%) = \frac{|m_{target} - m_{actual}|}{m_{target}} \times 100\% \quad (2.9)$$

d. *Two-stage Dosing*

$$\Delta m_{threshold} = \dot{m} \times t_{delay} \quad (2.10)$$

Dimana :

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

- $\dot{m}$ = laju aliran massa (gram per detik)
- Δm = perubahan massa (gram)
- Δt = perubahan waktu (detik)

$$t_{delay} = t_{respons} - t_{perintah} \quad (2.11)$$

- t_{delay} = waktu keterlambatan sistem (s)
- $t_{respons}$ = waktu ketika massa benar-benar berhenti bertambah (s)
- $t_{perintah}$ = waktu ketika mikrokontroler memberikan perintah pompa OFF (s)

$$m_{stop} = m_{target} - m_{delay} \quad (2.12)$$

- $m_{berhenti}$ = massa saat pompa dihentikan
- m_{target} = massa target
- $\Delta m_{threshold}$ = kompensasi massa akibat delay

Maka *Two-stage Dosing* dengan ketentuan :

$$PWM = \begin{cases} PWM_{high}, & m_{actual} < m_{target,i} - \Delta m_{th} \\ PWM_{low}, & m_{target,i} - \Delta m_{th} \leq m_{actual} < m_{target,i} - O_{final} \\ 0, & m_{actual} \geq m_{target,i} - O_{final} \end{cases} \quad (2.13)$$

- PWM = nilai sinyal PWM yang diberikan ke pompa.
- PWM_{high} = nilai PWM tahap cepat (255).
- PWM_{low} = nilai PWM tahap presisi (120).
- m_{actual} = massa aktual hasil pembacaan *load cell* (g).
- $m_{target,i}$ = massa target komponen ke-*i* (g).

- Δm_{th} = massa ambang (*threshold*) untuk perpindahan dari PWM 255 ke PWM 120 (g).
- O_{final} = nilai kompensasi penghentian pompa (*stop compensation*) untuk mengantisipasi sisa aliran setelah pompa dimatikan (g).

Pompa bekerja pada PWM tahap cepat (PWM_{high})

selama massa aktual masih lebih kecil dari batas perpindahan ($m_{target,i} - \Delta m_{th}$).

Ketika massa aktual telah mencapai batas tersebut, sistem menurunkan kecepatan pompa menjadi PWM tahap presisi (PWM_{low}) agar laju penambahan massa lebih kecil. Selanjutnya, pompa dihentikan ketika massa aktual telah mencapai batas penghentian ($m_{target,i} - O_{final}$). Nilai O_{final} digunakan sebagai kompensasi terhadap sisa aliran (*overshoot*) yang masih keluar setelah pompa dimatikan sehingga massa akhir mendekati target yang ditentukan.

Pada metode *Gravimetric Dosing*, pengendalian jumlah bahan dilakukan berdasarkan massa yang terbaca oleh sensor *load cell*. Massa cat yang masuk ke wadah pencampur dibaca secara langsung oleh *load cell* melalui modul HX711, kemudian nilai tersebut digunakan sebagai umpan balik untuk menentukan kondisi kerja pompa. Apabila massa yang terbaca belum mencapai target, pompa tetap bekerja. Ketika massa mendekati target, kecepatan pompa dapat diturunkan, dan ketika massa telah mencapai batas yang ditentukan, pompa dihentikan. Dalam penerapannya, pembacaan *load cell* dapat mengalami fluktuasi kecil akibat noise sensor, getaran mekanik, atau perubahan sinyal pada modul HX711. Fluktuasi tersebut dapat memengaruhi keputusan sistem, terutama ketika massa cat sudah mendekati target. Oleh karena itu, data pembacaan massa diproses menggunakan metode moving average sebelum digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan[20].

Moving average merupakan metode perataan data dengan cara menghitung rata-rata dari beberapa data pembacaan terakhir. Metode ini digunakan agar nilai massa yang dibaca sistem menjadi lebih stabil dan tidak terlalu dipengaruhi oleh perubahan kecil sesaat. Persamaan moving average dapat dituliskan sebagai berikut:

$$MA = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (2.14)$$

Keterangan:

- MA adalah nilai rata-rata bergerak
- $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ adalah data pembacaan massa
- n adalah jumlah data yang dirata-ratakan.

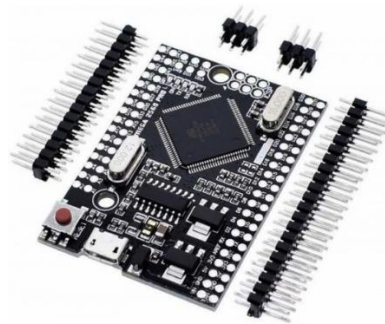
Pada sistem ini, hasil moving average digunakan sebagai nilai massa utama untuk proses dosing. Dengan demikian, keputusan pompa tidak diambil dari satu data pembacaan tunggal, melainkan dari hasil rata-rata beberapa pembacaan.

2.4. Komponen Sistem

2.4.1. Arduino Mega Pro mini

Arduino Mega 2560 Pro Mini merupakan mikrokontroler berbasis ATmega2560 yang digunakan sebagai pusat pengendali sistem elektronik dan otomasi. Board ini dirancang untuk memproses data dari sensor serta mengontrol aktuator sesuai logika program yang ditanamkan melalui perangkat lunak arduino IDE berbasis bahasa C/C++. Platform arduino bersifat open-source sehingga memudahkan integrasi perangkat keras dan perangkat lunak dalam pengembangan sistem kontrol otomatis.

arduino Mega 2560 Pro Mini menyediakan jumlah pin input/output yang besar cocok digunakan pada sistem yang membutuhkan banyak komponen I/O. Board ini memiliki 54 pin digital I/O, dengan beberapa pin mendukung keluaran PWM untuk pengaturan kecepatan motor atau aktuator, serta pin input analog untuk membaca sinyal sensor. Bentuk fisik modul mikrokontroler yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3. arduino Mega 2560 Pro Mini [21]

Berdasarkan Gambar 2.3, Arduino Mega Pro Mini digunakan sebagai pengendali utama sistem. Selain itu, tersedia beberapa port komunikasi serial (UART) yang dapat komunikasi dengan perangkat lain seperti modul sensor, komputer, maupun sistem embedded lainnya. Dari sisi kelistrikan, board ini beroperasi pada tegangan kerja 5V dengan tegangan masukan yang direkomendasikan sekitar 7–12V. Memori flash berkapasitas besar serta kecepatan clock 16 MHz memungkinkan mikrokontroler menjalankan program kontrol dan pengolahan data sensor [21].

Spesifikasi teknis Arduino Mega Pro Mini yang digunakan sebagai pengendali utama pada alat ini ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2. Spesifikasi Aruino mega pro mini

Komponen	Spesifikasi
<i>Microcontroller</i>	Atmega2560
Tegangan operasi	5V
Tegangan input (disarankan)	7-12V
Tegangan input (batas)	6-20V
Digital I/O	54 PIN
PWM digital I/O	15 PIN
Input analog	16 PIN
Arus DC per pin I/O	20mA
Arus DC pin 3.3V	50 Ma
<i>Flash memory</i>	256 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Kecepatan <i>clock</i>	16 MHz
LED bawaan	Pin 13
Dimensi	101,52 x 53,3 mm
Berat	37 gram

Berdasarkan Tabel 2.2, Arduino Mega Pro Mini memiliki spesifikasi yang mendukung kebutuhan sistem.

2.4.2. Raspberry Pi 4 Modul B

Raspberry Pi merupakan komputer papan tunggal (single board computer / SBC) berukuran kecil yang dikembangkan oleh raspberry Pi Foundation untuk mendukung pengembangan sistem komputasi berbiaya rendah. Perangkat ini memiliki ukuran sekitar sebesar kartu kredit namun telah dilengkapi dengan prosesor, memori, serta berbagai antarmuka komunikasi sehingga dapat berfungsi seperti komputer mini[22]. Perangkat raspberry Pi 4B yang digunakan sebagai unit pemroses ditampilkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4. Raspberry pi 4B[23]

Berdasarkan Gambar 2.4, Raspberry Pi 4B digunakan untuk pengolahan citra dan komunikasi data. Raspberry Pi 4 Model B menggunakan prosesor ARM Cortex-A72 quad-core 64-bit dengan kecepatan hingga sekitar 1.5 GHz serta mendukung berbagai antarmuka seperti USB, HDMI, Ethernet, dan GPIO yang memungkinkan perangkat terhubung dengan sensor maupun aktuator pada sistem embedded. Selain itu, perangkat ini dapat menjalankan sistem operasi berbasis Linux seperti raspbian yang bersifat open source sehingga memudahkan pengembangan perangkat lunak menggunakan bahasa pemrograman seperti Python[24].

Spesifikasi raspberry Pi 4B yang berperan sebagai unit pemroses pada sistem ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3. Spesifikasi raspberry pi 4B

Komponen	Spesifikasi
----------	-------------

Prosesor	Broadcom BCM2712, Quad-core Arm Cortex-A76 64-bit @ 2.4 GHz
GPU	VideoCore VII (OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.2)
Memori (RAM)	LPDDR4X-4267 (opsi 1GB, 2GB, 4GB, 8GB, 16GB)
<i>Output Display</i>	Dual micro-HDMI, hingga 4Kp60 HDR
<i>Video Decode</i>	4Kp60 HEVC decoder
Konektivitas	Wi-Fi 802.11ac dual-band, Bluetooth 5.0 / BLE
USB	2× USB 3.0 (5Gbps), 2× USB 2.0
Jaringan	Gigabit Ethernet (PoE+ via HAT)
Penyimpanan	Slot microSD (mode SDR104 <i>HIGH</i> speed)
Kamera	2× MIPI 4-lane transceivers
Ekspansi	PCIe 2.0 x1 interface
GPIO	Header standar 40-pin
Catu daya	5V DC via USB-C (Power Delivery), hingga 5A
Suhu Operasi	0°C – 70°C

2.4.3. Pompa Peristaltik NKP-DC-S10B

Pompa peristaltik merupakan jenis pompa perpindahan positif yang bekerja dengan prinsip kompresi mekanis pada selang fleksibel untuk mendorong fluida. Fluida dipindahkan melalui selang elastis yang ditekan oleh roller yang berputar mengikuti gerakan rotor, sehingga terbentuk tekanan lokal yang mendorong cairan maju secara kontinu. Mekanisme ini memungkinkan fluida bergerak tanpa kontak langsung dengan komponen mekanik pompa, sehingga risiko kontaminasi dapat diminimalkan dan kebersihan fluida tetap terjaga [25]. Bentuk fisik pompa peristaltik yang digunakan dalam sistem ini ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5. *Peristaltik NKP-DC-S10 [26]*

Berdasarkan Gambar 2.5, pompa peristaltik digunakan untuk mengalirkan cat menuju mixing tank. Manual teknis produk NKP-DC-S10B menjelaskan bahwa pompa ini dirancang untuk aplikasi yang memerlukan akurasi tinggi seperti sistem dispensing cairan, peralatan medis, serta perangkat otomasi. Desain pompa memungkinkan cairan hanya bersentuhan dengan selang, sehingga aman digunakan untuk berbagai jenis cairan dan memudahkan proses perawatan serta penggantian selang. Selain itu, kemampuan integrasi dengan sistem kontrol digital menjadikan pompa ini sesuai untuk aplikasi otomasi berbasis mikrokontroler [26]

Spesifikasi modul NKP-DC-S10B yang digunakan dalam rangkaian sistem dapat dilihat pada Tabel 2.4.

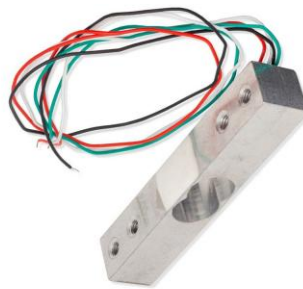
Tabel 2. 4. Spesifikasi NKP-DC-S10B

Komponen	Spesifikasi
Model	NKP-DC-S10B
Tegangan	12V DC
Arus	0.25A
<i>FLOW Rate</i>	5.2 ~ 90 ml/min
<i>Sound Level</i>	40 dB
<i>Product Dimensions (L x W x H)</i>	67mm x 55mm x 41mm
Bahan	Plastik
<i>Pump Tube Size</i>	3mm x 5mm
<i>Pump Tube Type</i>	<i>Silica gel tube</i>

2.4.4. *Load cell* 10 kg dan Modul HX711

2.4.4.1. *load cell*

load cell tipe strain gauge umumnya menggunakan konfigurasi jembatan Wheatstone dengan empat strain gauge untuk meningkatkan sensitivitas dan mengurangi pengaruh suhu. Sebagian gauge bekerja dalam kondisi tarik dan sebagian lainnya dalam kondisi tekan, sehingga perubahan resistansi akibat temperatur dapat saling mengompensasi. Pendekatan ini menjadikan *load cell* dapat menghasilkan pengukuran yang stabil dan akurat meskipun terjadi variasi suhu lingkungan. *load cell* bekerja dengan prinsip deformasi elastis, di mana gaya yang diberikan menghasilkan perubahan bentuk yang sangat kecil pada elemen struktural. Perubahan ini kemudian diterjemahkan menjadi perubahan tegangan listrik pada rangkaian jembatan. Besarnya sinyal keluaran sangat kecil (dalam orde millivolt per volt), sehingga diperlukan rangkaian penguat dan konverter analog-ke-digital untuk memproses sinyal menjadi data berat yang dapat dibaca oleh sistem mikrokontroler. Bentuk fisik sensor *load cell* yang digunakan sebagai sensor pembaca massa ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6. *load cell* [27]

Berdasarkan Gambar 2.6, *load cell* berfungsi mengukur massa cairan pada sistem. Berdasarkan spesifikasi teknis, *load cell* memiliki kapasitas pengukuran hingga 10 kg. Sensor ini dirancang untuk memberikan respon linier terhadap beban, dengan kesalahan non-linearitas, histeresis, dan *non-repeatability* yang sangat kecil [27].

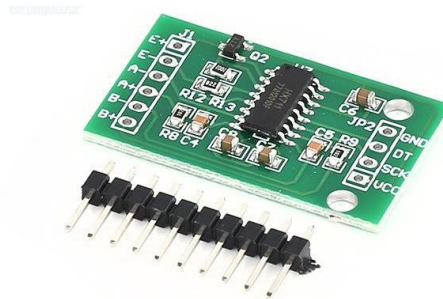
Spesifikasi *load cell* yang digunakan sebagai sensor pengukuran massa ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5. Spesifikasi *load cell*

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

2.4.4.2. Modul HX711

Modul HX711 merupakan penguat sinyal dan konverter analog-ke-digital (ADC) beresolusi tinggi yang dirancang khusus untuk sistem penimbangan digital menggunakan sensor jembatan Wheatstone seperti *load cell*. Modul ini memperkuat sinyal diferensial berlevel sangat kecil dari *load cell* dan mengubahnya menjadi data digital sehingga dapat diproses oleh mikrokontroler. Modul penguat sinyal yang digunakan bersama load cell ditunjukkan pada Gambar 2.7.

**Gambar 2. 7** Modul HX711 [28]

Berdasarkan Gambar 2.7, modul HX711 digunakan untuk membaca sinyal dari load cell. HX711 memiliki ADC 24-bit dengan penguat diferensial internal yang dapat membaca perubahan sinyal kecil secara akurat. Modul ini bekerja dengan tegangan operasi rendah dan mampu menghasilkan pembacaan data yang konsisten, sehingga banyak digunakan pada aplikasi timbangan digital dan sistem pengukuran massa presisi. Dalam penggunaannya, Modul HX711 merupakan konverter analog-ke-digital 24-bit yang dirancang untuk sistem penimbangan berbasis sensor jembatan. Modul ini

dilengkapi programmable gain amplifier dan dapat dioperasikan pada laju keluaran 10 SPS atau 80 SPS [29]

Spesifikasinya adalah seperti berikut ini:

- a. *Differential input voltage: $\pm 40mV$ (Full-scale differential input voltage $\pm 40mV$)*
- b. Resolusi ADC: 24-bit
- c. Laju data: 10 SPS atau 80 SPS
- d. Tegangan operasi modul: menyesuaikan rangkaian, pada sistem digunakan 5 V
- e. *Operating current : $<10 mA$*
- f. *Size: $38mm*21mm*10mm$.*

2.4.4.3. Kalibrasi dan Konversi Pembacaan *load cell*

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

Faktor kalibrasi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Faktor\ Kalibrasi = \frac{RAW_{beban} - RAW_0}{Beban} \quad (2.15)$$

Keterangan:

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

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

$$Berat = \frac{RAW - Offset}{Faktor\ Kalibrasi} \quad (2.16)$$

Keterangan:

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

- Faktor Kalibrasi adalah nilai hasil perhitungan kalibrasi.

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

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

$$Error(\%) = \frac{| \text{Beban Asli} - \text{Berat Terbaca} |}{\text{Beban Asli}} \times 100\% \quad (2.17)$$

Selain persentase error, tingkat akurasi pembacaan *load cell* juga perlu dihitung untuk mengetahui seberapa dekat hasil pembacaan sensor terhadap beban asli yang digunakan sebagai acuan, Akurasi pembacaan *load cell* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Akurasi(\%) = 100\% - Error(\%)$$

Keterangan:

- Akurasi = tingkat kedekatan hasil pembacaan sensor terhadap beban asli (%)
- Error = persentase selisih antara beban asli dan berat terbaca

2.4.4.4. Evaluasi Akurasi dan Presisi Pembacaan *load cell*

Presisi menunjukkan tingkat konsistensi hasil pembacaan *load cell* ketika pengukuran dilakukan secara berulang pada beban yang sama. Presisi tidak hanya dilihat dari kedekatan hasil pembacaan terhadap beban asli, tetapi dari seberapa kecil penyebaran hasil pengukuran berulang. Dalam evaluasi pengukuran, presisi dapat dinyatakan menggunakan standar deviasi atau koefisien variasi. Pedoman validasi metode analitik ICH Q2(R2) menyatakan bahwa presisi dari serangkaian pengukuran dapat dinyatakan melalui variance, standard deviation, atau Koefisien Variasi [30]. Standar deviasi digunakan untuk mengetahui sebaran hasil pembacaan terhadap nilai rata-rata. Rumus standar deviasi sampel adalah:

$$\text{Standar Deviasi} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.18)$$

Keterangan:

SD adalah standar deviasi,

x_i adalah data pembacaan pada setiap percobaan,

$\bar{x}$ adalah nilai rata-rata hasil pembacaan,

n adalah jumlah pengulangan pengukuran.

Selain standar deviasi, presisi juga dapat dianalisis menggunakan koefisien variasi atau Koefisien Variasi. Koefisien variasi menunjukkan besar penyebaran hasil pengukuran relatif terhadap nilai rata-ratanya, sehingga dapat digunakan untuk membandingkan kestabilan pembacaan pada beberapa titik beban yang berbeda.

Rumus koefisien variasi adalah:

$$KV(\%) = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2.19)$$

Keterangan:

KV adalah koefisien variasi (%);

SD adalah standar deviasi hasil pengukuran,

$\bar{x}$ *relat* adalah rata-rata hasil pengukuran

Koefisien variasi digunakan untuk menunjukkan besar penyebaran hasil pengukuran relatif terhadap nilai rata-ratanya. Koefisien variasi dihitung dari perbandingan antara standar deviasi dan rata-rata hasil pengukuran. Nilai koefisien variasi yang semakin kecil menunjukkan bahwa variasi relatif hasil pengukuran semakin rendah [31].

2.4.4.5. Linearitas dan Koefisien Determinasi

Linearitas menunjukkan kemampuan sensor dalam menghasilkan perubahan keluaran yang sebanding dengan perubahan nilai masukan pada suatu rentang pengukuran. Pada *load cell*, linearitas dapat dianalisis dengan menerapkan regresi linier antara massa standar sebagai variabel independen dan massa hasil pembacaan sensor sebagai variabel dependen. Persamaan regresi linier digunakan untuk membentuk garis yang mewakili hubungan antara kedua variabel tersebut.

Tingkat kesesuaian data pengukuran terhadap model regresi dapat diketahui melalui koefisien determinasi (R^2). Nilai R^2 menunjukkan bagian variasi pada variabel dependen yang dapat dijelaskan oleh variabel independen melalui model regresi. Nilai yang semakin mendekati satu menunjukkan bahwa titik-titik pengukuran semakin dekat dengan garis regresi. Esposito dkk. melakukan kalibrasi statis *load cell* menggunakan beban yang diketahui dan memperoleh nilai $R^2 = 0,99$, yang digunakan untuk mengonfirmasi perilaku linier *load cell* tersebut [32].

Meskipun demikian, nilai R^2 tidak digunakan sebagai satu-satunya parameter untuk menilai kinerja sensor. Koefisien determinasi menunjukkan kesesuaian data terhadap model regresi, tetapi tidak secara langsung menunjukkan akurasi sensor. Oleh karena itu, analisis linearitas perlu dilengkapi dengan evaluasi error, standar deviasi, dan koefisien variasi. Kajian mengenai praktik kalibrasi juga menjelaskan bahwa nilai R^2 menggambarkan proporsi variasi respons yang dijelaskan oleh model regresi, tetapi nilai yang mendekati satu belum cukup digunakan sendiri untuk membuktikan linearitas suatu prosedur kalibrasi [33].

Dengan persamaan sebagai berikut :

Keterangan:

- R^2 = koefisien determinasi;
- y_i = hasil pembacaan sensor ke- i ;
- $\hat{y}_i$ = hasil prediksi berdasarkan persamaan regresi;
- $\bar{y}$ = rata-rata hasil pembacaan;
- n = jumlah data pengujian.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.20)$$

2.4.5. Motor DC 555 12V

2.4.5.1. Spesifikasi dan Gambaran umum

Motor DC merupakan perangkat elektromekanik yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa gerakan putar. Prinsip kerja motor DC didasarkan pada interaksi antara medan magnet dan arus listrik yang mengalir pada kumparan motor. Ketika arus listrik dialirkan, medan magnet yang dihasilkan akan

berinteraksi dengan magnet permanen sehingga menghasilkan torsi yang menyebabkan rotor berputar. Besarnya kecepatan putar dan torsi motor dipengaruhi oleh tegangan kerja, karakteristik motor, serta beban yang diberikan pada poros motor.

Pada penelitian ini digunakan motor DC tipe 555 *HIGH* Torque Planetary Geared Motor dengan kecepatan keluaran 430 RPM pada tegangan kerja 12 VDC. Motor ini dipilih karena memiliki torsi yang relatif besar sehingga mampu digunakan sebagai penggerak sistem pengaduk cat. Penggunaan planetary gearbox pada motor berfungsi untuk menurunkan kecepatan putar motor sekaligus meningkatkan torsi keluaran sehingga motor dapat bekerja lebih stabil saat mengaduk fluida dengan viskositas tertentu.

Berdasarkan spesifikasi produk, motor yang digunakan memiliki torsi sebesar 5 N·m, daya 10 W, tingkat perlindungan IP44, serta menggunakan sistem transmisi planetary gear reducer. Motor ini juga dilengkapi dengan kumparan tembaga (pure copper coils), magnet berkekuatan tinggi (*HIGH*-strength magnets), dan konstruksi logam penuh (all-metal construction) yang mendukung umur pakai yang lebih panjang. Selain itu, motor dapat dikendalikan menggunakan metode Pulse Width Modulation (PWM) sehingga kecepatan putar dapat disesuaikan dengan kebutuhan proses pengadukan. Dengan karakteristik tersebut, motor DC 555 planetary gear 430 RPM dinilai sesuai untuk digunakan sebagai aktuator utama pada sistem pencampuran cat otomatis yang dikembangkan dalam penelitian ini [34]. Bentuk fisik motor yang digunakan sebagai aktuator pengaduk ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8. 555 *HIGH* Torque [34]

Berdasarkan Gambar 2.7, modul HX711 digunakan untuk membaca sinyal dari load cell. Spesifikasi motor DC 555 yang digunakan sebagai penggerak pada sistem ditunjukkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6. Spesifikasi Motor 555

Parameter	Spesifikasi
Tipe Motor	555 <i>HIGH</i> Torque Planetary Geared Motor
Tegangan Kerja	12 VDC
Kecepatan Output	430 RPM
Torsi	5 N·m
Daya	10 W
Proteksi	IP44
Sistem Gear	Planetary Gear Reducer
Material Kumpanan	Tembaga Murni
Bahan	Full Metal

2.4.5.2. Perhitungan Kebutuhan Torsi Pengaduk Cat

2.4.5.2.1. Konversi Viskositas

Viskositas cat yang dinyatakan dalam satuan centipoise (cP) perlu dikonversi ke satuan SI, yaitu Pascal-second (Pa.s), agar dapat digunakan pada perhitungan bilangan Reynolds.

$$\mu_{Pa.s} = \mu_{cP} \times 0,001 \quad (2.21)$$

Keterangan:

μ = viskositas dinamis fluida

cP = centipoise

Pa.s = Pascal-second

2.4.5.2.2. Konversi Kecepatan Putar

Kecepatan putar motor umumnya dinyatakan dalam satuan rotation per minute (RPM). Untuk perhitungan pengadukan, kecepatan putar perlu dikonversi menjadi putaran per detik.

$$n = \frac{N}{60} \quad (2.22)$$

Keterangan:

n = kecepatan putar dalam satuan s^{-1}

N = kecepatan putar motor dalam RPM

2.4.5.2.3. Bilangan Reynolds pada Proses Pengadukan

Bilangan Reynolds digunakan untuk mengetahui jenis aliran pada proses pengadukan. Nilai Reynolds dipengaruhi oleh densitas fluida, kecepatan putar impeller, diameter impeller, dan viskositas fluida.

$$Re = \frac{\rho n D^2}{\mu} \quad (2.23)$$

Keterangan:

Re = bilangan Reynolds

ρ = densitas fluida (kg/m^3)

n = kecepatan putar impeller (s^{-1})

D = diameter impeller (m)

μ = viskositas dinamis fluida (Pa.s)

Pada proses pengadukan, nilai Re yang kecil menunjukkan bahwa aliran cenderung laminar. Pada perancangan ini, aliran dikategorikan laminar apabila nilai Re kurang dari 10.

2.4.5.2.4. Power Number

Power number merupakan bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk memperkirakan kebutuhan daya pengadukan.

Pada perhitungan ini digunakan nilai konstanta $K = 70$, sehingga:

$$N_p = \frac{70}{Re} \quad (2.24)$$

Keterangan:

N_p = power number

K = konstanta empiris pada daerah aliran laminar

Re = bilangan Reynolds

2.4.5.2.5. Daya Pengadukan

Daya pengadukan dipengaruhi oleh power number, densitas fluida, kecepatan putar, dan diameter impeller. Semakin besar diameter impeller atau kecepatan putar, semakin besar daya yang diperlukan.

$$P = N_p \rho n^3 D^5 \quad (2.25)$$

Keterangan:

P = daya pengadukan (W)

N_p = power number

ρ = densitas fluida (kg/m^3)

n = kecepatan putar impeller (s^{-1})

D = diameter impeller (m)

2.4.5.2.6. Kecepatan Sudut

Kecepatan sudut diperlukan untuk menghitung torsi. Nilai ini diperoleh dari kecepatan putar dalam satuan putaran per detik.

$$\omega = 2\pi n \quad (2.26)$$

Keterangan:

ω = kecepatan sudut (rad/s)

π = konstanta 3,14

n = kecepatan putar impeller (s^{-1})

2.4.5.2.7. Torsi Pengadukan

Torsi pengadukan adalah momen gaya yang dibutuhkan motor untuk memutar impeller dalam fluida. Nilai torsi diperoleh dari hubungan antara daya dan kecepatan sudut.

$$T = \frac{P_m}{\omega} \quad (2.27)$$

Keterangan:

T = torsi pengadukan (N.m)

P_m = daya pengadukan terkoreksi (W)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

2.4.5.2.8. Konversi Torsi

Torsi motor pada spesifikasi komponen sering dinyatakan dalam kg.cm. Oleh karena itu, hasil torsi dalam satuan N.m dikonversi ke kg.cm.

$$T_{kg.cm} = T_{N.m} \times 10,197 \quad (2.28)$$

2.4.5.2.9. Faktor Keamanan dan Faktor Shaft

Faktor keamanan atau *safety factor* merupakan nilai koreksi yang digunakan untuk memberikan batas aman pada suatu komponen agar tetap mampu bekerja meskipun menerima beban yang lebih besar dari hasil perhitungan teoritis. Pada perancangan poros, faktor keamanan diperlukan karena kondisi kerja aktual tidak selalu sama dengan kondisi ideal, terutama apabila terdapat kemungkinan beban tambahan, rugi mekanik, atau ketidakpastian pada data perhitungan. Samudra dan Haris menjelaskan bahwa faktor keamanan berfungsi sebagai pengaman pada poros apabila poros menerima beban di luar atau melebihi hasil perhitungan, sehingga komponen yang dirancang tidak mengalami kegagalan saat digunakan[35].

Faktor koreksi poros digunakan untuk memperhitungkan kondisi pembebanan aktual pada poros yang tidak selalu bekerja secara ideal. Pada perancangan poros, faktor koreksi momen puntir atau faktor koreksi tumbukan digunakan berdasarkan karakteristik beban. Untuk beban halus digunakan nilai 1,0, untuk beban dengan sedikit kejutan atau tumbukan digunakan nilai 1,0–1,5, sedangkan untuk beban dengan kejutan atau tumbukan berat digunakan nilai 1,5–3,0[36].

Maka rumus yang di gunakan dalam perhitungan akhir yaitu :

$$T_{motor} = T \times SF \quad (2.29)$$

$$T_{akhir} = T_{motor} \times K_s \quad (2.30)$$

Keterangan:

T_{motor} = torsi motor setelah faktor keamanan

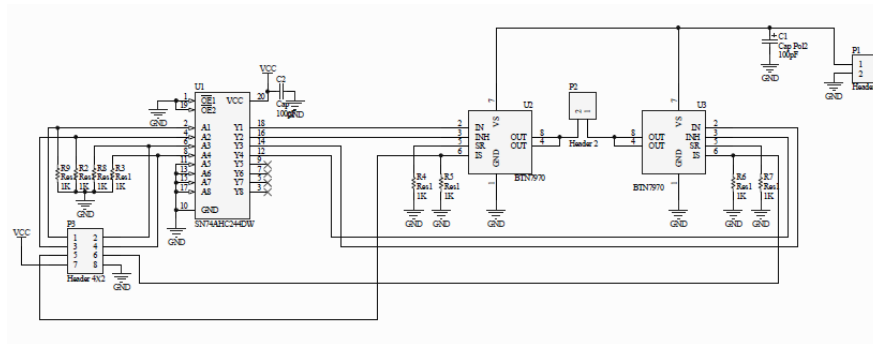
T_{akhir} = torsi akhir perancangan

SF = faktor keamanan

K_s = faktor shaft

2.4.6. Drive Module BTS7960

Driver motor BTS7960 merupakan modul pengendali motor DC berbasis rangkaian full H-bridge yang digunakan untuk mengatur arah putaran dan kecepatan motor secara elektronik. Modul ini agar motor berputar searah maupun berlawanan arah jarum jam dengan mengendalikan polaritas tegangan yang diberikan ke motor. Skematik driver motor yang digunakan untuk mengendalikan motor DC ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9. Skematik BTS7960 [37]

Detail Pin Input :

1. RPWM = Input PWM Forward Level ,Aktif *HIGH*
2. LPWM = Input PWM Reverse Level ,Aktif *HIGH*
3. R_EN = Input Enable Forward Driver, Aktif *HIGH*
4. L_E = Input Enable Reverse Driver, Aktif *HIGH*
5. R_IS = Forward Drive ,Side current alarm output
6. L_IS = Reverse Drive, Side current alarm output
7. Vcc = +5 V Power Supply Mikrokontroler
8. Gnd = Gnd Power Supply Mikrokontroler

Berdasarkan Gambar 2.9, BTS7960 digunakan sebagai driver motor DC. BTS7960 dapat menerima arus tinggi hingga sekitar 43 A dan bekerja pada tegangan suplai sekitar 6-27 V DC, sehingga sesuai untuk aplikasi yang memerlukan penggerak motor berdaya besar. Modul ini juga mendukung pengendalian menggunakan sinyal Pulse

Width Modulation (PWM) sehingga kecepatan motor dapat diatur secara efisien dan presisi sesuai kebutuhan beban.

Selain kemampuan pengendalian daya tinggi, driver BTS7960 dilengkapi sistem proteksi terhadap arus berlebih dan panas berlebih untuk menjaga keandalan sistem. Antarmuka logika 3,3–5 V memungkinkan modul ini dikendalikan langsung oleh mikrokontroler seperti arduino[37].

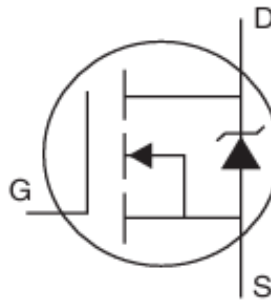
Dibawah ini merupakan spesifikasi Drive Module BTS7960 :

- Double BTS7960 *HIGH* current (43A) H-bridge drivers
- Input voltage: 6V-27V
- Model: IBT-2
- Maximum current: 43A
- Input level: 3.3-5V
- Control mode: PWM or level

2.4.7. MOSFET IRLZ44N

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) merupakan komponen semikonduktor yang banyak digunakan sebagai saklar elektronik dan penguat sinyal dalam rangkaian sistem kontrol daya. Berbeda dengan transistor bipolar, MOSFET dikendalikan oleh tegangan pada terminal gate sehingga arus yang dibutuhkan untuk pengendalian sangat kecil. Karakteristik ini menjadikan MOSFET efisien digunakan sebagai pengendali beban berarus besar yang dikontrol oleh mikrokontroler

MOSFET tipe N-channel seperti IRLZ44N bekerja dengan mengatur aliran arus antara terminal drain dan source berdasarkan tegangan gate-source (VGS). Ketika tegangan gate melebihi tegangan ambang, kanal konduksi terbentuk sehingga arus dapat mengalir ke beban. Karena arus gate sangat kecil, MOSFET sering disebut sebagai perangkat yang dikendalikan tegangan (voltage controlled device) dan berfungsi efektif sebagai saklar elektronik berkecepatan tinggi [38] Simbol skematik komponen MOSFET N-channel ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10. simbol skematik MOSFET N-channel [39]

Berdasarkan Gambar 2.10, MOSFET IRLZ44N berfungsi sebagai sakelar elektronik. IRLZ44N termasuk MOSFET logic-level yang dapat diaktifkan langsung oleh sinyal logika 5V dari mikrokontroler. Komponen ini memiliki resistansi drain-source rendah saat aktif ($R_{DS(on)}$) sehingga kerugian daya dan panas yang dihasilkan menjadi kecil. Berdasarkan karakteristik, MOSFET ini mampu menangani arus besar dan memiliki tegangan drain-source maksimum sekitar 55 V, sehingga cocok digunakan untuk mengendalikan motor DC, pompa, dan beban induktif lainnya.

Spesifikasi MOSFET IRLZ44N yang berfungsi sebagai saklar elektronik pada rangkaian driver ditunjukkan pada Tabel 2.7.

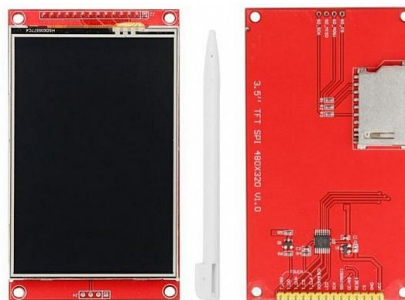
Tabel 2. 7. spesifikasi Mosfet IRLZ44N

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

2.4.8. LCD TFT 3.5 inch

Thin Film Transistor Liquid Crystal Display (TFT LCD) merupakan jenis layar berbasis matriks aktif yang menggunakan transistor tipis pada setiap piksel untuk mengendalikan intensitas cahaya secara individual. Teknologi ini memungkinkan tampilan grafis dengan resolusi tinggi dan respons visual yang stabil. Pada sistem berbasis mikrokontroler, TFT LCD berfungsi sebagai antarmuka operator (Human Machine Interface/HMI) untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor maupun status kerja sistem.

Dalam penelitian yang menggunakan arduino mega pro mini sebagai pengolah data, TFT LCD 3.6 inch dimanfaatkan untuk menampilkan hasil pengolahan sinyal secara *realtime*. Data analog dari sensor terlebih dahulu dikonversi oleh ADC internal arduino, kemudian diproses dan divisualisasikan dalam bentuk numerik maupun grafik pada layar TFT. Integrasi ini menunjukkan bahwa mikrokontroler tidak hanya berperan sebagai pengendali, tetapi juga sebagai pengolah dan penyaji informasi secara langsung [40]. Bentuk fisik modul layar yang digunakan sebagai antarmuka pengguna ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11. *LCD Display Module 3.6 Inch [41]*

Berdasarkan Gambar 2.11, LCD TFT digunakan sebagai antarmuka pengguna. TFT LCD yang digunakan pada sistem arduino umumnya memiliki resolusi 480×320 piksel dengan antarmuka paralel 16-bit atau 8-bit. Berdasarkan penelitian perancangan alat ukur berbasis arduino Mega, layar TFT 3.6 inch digunakan untuk menampilkan hasil konversi nilai sensor yang telah diproses oleh mikrokontroler. Tegangan kerja modul TFT biasanya 5 V untuk logika internal, sementara papan arduino Mega bekerja pada

5 V sehingga diperlukan pengaturan level tegangan atau penggunaan shield yang telah disesuaikan.

arduino mega pro mini, yang berbasis ATmega2560, memiliki 54 pin digital sehingga mendukung koneksi langsung ke modul TFT paralel tanpa memerlukan ekspander tambahan. Keunggulan jumlah pin yang besar ini membuat sistem mampu menghubungkan layar grafis, sensor, serta aktuator secara bersamaan dalam satu platform [42].

Dalam konteks sistem pencampuran cat otomatis, TFT LCD 3.6 inch berperan sebagai media untuk menampilkan resep warna, nilai berat aktual dari *load cell*, status pompa, serta indikator proses mixing. Penggunaan layar grafis memberikan kejelasan informasi dibandingkan tampilan karakter 16×2 konvensional. Dengan resolusi yang lebih tinggi, pengguna dapat melihat data dalam format yang lebih informatif dan terstruktur.

Spesifikasi layar LCD TFT yang digunakan sebagai antarmuka pengguna (touchscreen) ditunjukkan pada Tabel 2.8.

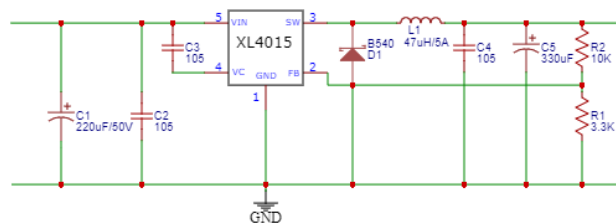
Tabel 2. 8. Spesifikasi LCD TFT

Komponen	Spesifikasi
Ukuran Layar	3.5 inch TFT
Driver IC	ST7793
Resolusi	240 × 400 pixel
Jenis Touch	Resistive Touch Panel
Kompatibilitas:	arduino UNO R3 arduino Mega 2560
Library	Adafruit_TFTLCD, Adafruit_GFX, Adafruit Touchscreen, MCUFRIEND_kbv, SPFD5408

2.4.9. Module Step-Down XL4015

Modul XL4015 merupakan konverter DC–DC tipe buck (step-down) yang digunakan untuk menurunkan tegangan input menjadi tegangan keluaran yang lebih rendah sesuai kebutuhan beban. Komponen ini bekerja dengan prinsip switching

frekuensi tinggi, di mana energi disimpan pada induktor dan kemudian dilepaskan ke beban melalui rangkaian filter sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang stabil dan efisien [43]. Rangkaian skematik dari rangkaian penurun tegangan ini ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12. Rangkaian Skematik *Buck converter*
(Dokumentasi Peneliti)

Berdasarkan Gambar 2.12, buck converter digunakan untuk menurunkan tegangan catu daya. Modul XL4015 beroperasi pada frekuensi switching sekitar 180 kHz, dapat digunakan saat menggunakan filter berukuran lebih kecil dan dapat meningkatkan efisiensi sistem. Modul ini dapat menangani arus beban hingga sekitar 5 A dengan regulasi tegangan yang baik, sehingga cocok digunakan sebagai catu daya pada sistem elektronik dan pengisian baterai [44].

2.4.10. Power supply 10A/12V

Power supply merupakan perangkat yang berfungsi mengubah dan menyalurkan energi listrik agar sesuai dengan kebutuhan tegangan dan arus pada sebuah system atau perangkat elektronik. Dalam sistem elektronik, power supply berperan menyediakan sumber daya sehingga perangkat dapat bekerja secara optimal dan aman. power supply dapat menyuplai daya yang kontinu dan stabil dibandingkan sumber energi seperti baterai, yang cenderung mengalami penurunan tegangan dan memerlukan penggantian berkala. Bentuk fisik catu daya yang digunakan pada sistem ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13. *I/O Power Supply* [45]

Berdasarkan Gambar 2.13, power supply menyediakan sumber tegangan DC pada sistem. Power supply terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu transformator atau adaptor sebagai penurun tegangan, penyearah (rectifier) untuk mengubah arus AC menjadi DC, serta regulator tegangan untuk menjaga kestabilan keluaran. Tegangan dan arus yang stabil sangat penting untuk mencegah gangguan kinerja perangkat elektronik serta meningkatkan keandalan sistem [45].

Dalam penelitian ini digunakan power supply 12 V 10 A sebagai sumber daya utama sistem. Kapasitas arus 10 A dipilih untuk memastikan seluruh komponen seperti pompa, motor, sensor, dan modul kontrol memperoleh suplai daya yang cukup dan stabil. Tegangan 12 V digunakan karena sesuai dengan kebutuhan sebagian besar aktuator dan modul elektronik pada sistem otomasi.

2.4.11. Pilot Lamp 12VDC

Pilot lamp merupakan perangkat indikator visual yang digunakan untuk menunjukkan kondisi operasi suatu sistem kontrol atau peralatan listrik. Komponen ini bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi cahaya sehingga status sistem dapat dipantau secara langsung oleh operator. Dalam sistem kontrol industri, pilot lamp digunakan sebagai penunjuk kondisi seperti proses aktif, sistem siap, maupun keadaan gangguan. Bentuk fisik komponen indikator ini ditunjukkan pada Gambar 2.14.



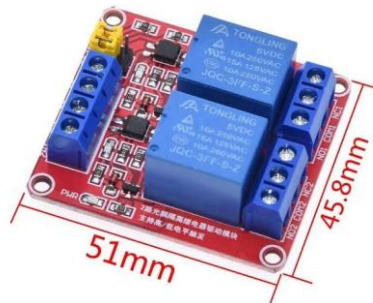
Gambar 2. 14. Pilot Lamp [46]

Berdasarkan Gambar 2.14, pilot lamp digunakan sebagai indikator kondisi sistem. Prinsip kerja pilot lamp sederhana, ketika tegangan diberikan pada terminal lampu, arus listrik mengalir melalui elemen pencahayaan sehingga lampu menyala dan menghasilkan sinyal visual. Lampu indikator dapat dihubungkan dengan rangkaian kontrol sehingga menyala atau mati sesuai kondisi logika sistem. Penggunaan indikator visual ini membantu operator memahami kondisi mesin tanpa harus membaca parameter sistem secara detail [46].

Pada sistem ini digunakan pilot lamp 12VDC berwarna merah dan hijau sebagai indikator status operasi. Lampu hijau menunjukkan kondisi sistem sudah selesai beroperasi, sedangkan lampu merah digunakan sebagai indikator sistem sedang berjalan.

2.4.12. Relay 2 Channel 12V

Relay merupakan saklar elektromekanis yang bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik untuk menghubungkan atau memutus rangkaian listrik. Komponen ini terdiri dari kumparan (coil), inti besi, serta kontak saklar mekanis. Ketika arus listrik mengalir pada kumparan, medan magnet terbentuk dan menarik kontak saklar sehingga terjadi perubahan kondisi dari terbuka menjadi tertutup atau sebaliknya. Modul relay dual channel menyediakan dua rangkaian relay dalam satu papan sehingga dapat mengendalikan dua beban secara independen. Setiap channel memiliki terminal kontak NO (*Normally Open*), NC (*Normally Closed*), dan COM (*Common*) yang memungkinkan berbagai konfigurasi pengendalian rangkaian Listrik[47]. Bentuk fisik modul relay yang digunakan sebagai saklar elektronik ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2. 15. Relay 2 Channel 12V [47]

Berdasarkan Gambar 2.15, relay digunakan sebagai sakelar yang dikendalikan mikrokontroler. Dalam sistem pencampuran cairan otomatis, relay dual channel 12VDC digunakan untuk mengendalikan aktuator LED, Dengan kemampuan mengontrol beban berdaya lebih tinggi melalui sinyal kontrol berdaya rendah, relay berperan penting dalam integrasi antara mikrokontroler dan perangkat mekanis.

2.4.13. Dioda SS34

Dioda SS34 merupakan dioda tipe Schottky barrier rectifier yang digunakan untuk penyearahan tegangan dan proteksi rangkaian pada sistem elektronik. Berbeda dengan dioda silikon konvensional, dioda Schottky menggunakan sambungan logam–semikonduktor sehingga menghasilkan tegangan jatuh maju (forward voltage drop) yang lebih rendah dan waktu switching yang lebih cepat [48]. Bentuk fisik dioda Schottky yang digunakan pada rangkaian ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2. 16. Schottky [48]

Berdasarkan Gambar 2.16, dioda Schottky digunakan sebagai pelindung rangkaian dari arus balik. Karakteristik utama dioda SS34 meliputi kemampuan arus rata-rata hingga sekitar 3 A, tegangan reverse maksimum sekitar 40 V, serta tegangan jatuh maju berkisar 0,5–0,75 V. Nilai tegangan maju yang rendah memungkinkan efisiensi konversi daya yang lebih baik dan mengurangi rugi-rugi energi pada rangkaian. Selain itu, dioda Schottky memiliki kemampuan switching cepat dan rugi daya rendah

sehingga banyak digunakan pada rangkaian DC–DC converter, penyearah frekuensi tinggi, *freewheeling diode*, dan proteksi polaritas. Kemampuan arus surge yang tinggi juga membantu melindungi rangkaian dari lonjakan arus sesaat [datashit ss34]. Dalam sistem elektronika, dioda SS34 digunakan untuk mencegah arus balik, meningkatkan efisiensi catu daya, serta melindungi komponen dari kesalahan polaritas. Pada rangkaian catu daya dan konverter tegangan, penggunaan dioda Schottky membantu meningkatkan keestabilan sistem.

2.4.14. Kapasitor

Kapasitor merupakan komponen elektronika yang berfungsi menyimpan muatan listrik sementara dalam medan listrik yang terbentuk antara dua konduktor yang dipisahkan oleh bahan dielektrik. Kemampuannya menyimpan energi listrik dinyatakan sebagai kapasitansi dan dipengaruhi oleh jenis bahan dielektrik yang digunakan proto[49]. Bentuk fisik kapasitor elektrolit yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2. 17. Kapasitor *elco* [49]

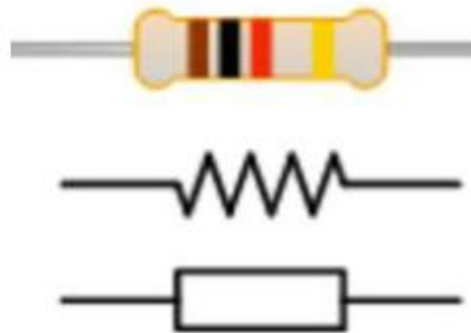
Berdasarkan Gambar 2.17, kapasitor berfungsi menjaga kestabilan tegangan pada rangkaian. Kapasitor elektrolit (ELCO) menggunakan elektrolit sebagai bahan dielektrik sehingga mampu menghasilkan nilai kapasitansi yang besar dalam ukuran fisik yang relatif kecil. Kapasitor jenis ini bersifat polar sehingga pemasangannya harus memperhatikan terminal positif dan negatif. ELCO banyak digunakan pada rangkaian catu daya untuk meredam ripple tegangan, menyaring noise, serta menjaga kestabilan tegangan keluaran [49].

Sebaliknya, kapasitor keramik menggunakan bahan keramik sebagai dielektrik yang memiliki sifat isolasi listrik dan ketahanan panas yang baik. Kapasitor ini tidak memiliki polaritas sehingga dapat dipasang pada kedua arah. Selain itu, kapasitor

keramik memiliki respon frekuensi tinggi yang baik serta stabil terhadap perubahan suhu, sehingga sering digunakan sebagai bypass capacitor dan filter gangguan frekuensi tinggi pada rangkaian elektronik.

2.4.15. Resistor

Resistor merupakan komponen elektronika pasif yang berfungsi menghambat atau membatasi aliran arus listrik dalam suatu rangkaian. Komponen ini bekerja dengan menghasilkan penurunan tegangan di antara kedua terminalnya sehingga arus yang mengalir dapat dikendalikan sesuai kebutuhan rangkaian. Nilai hambatan resistor dinyatakan dalam satuan ohm (Ω), yang menunjukkan besarnya resistansi terhadap arus listrik. Bentuk fisik komponen resistor ditunjukkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2. 18. Resistor [50]

Berdasarkan Gambar 2.18, resistor digunakan untuk membatasi arus listrik. Nilai resistansi pada resistor tetap umumnya ditunjukkan melalui kode warna gelang pada badan resistor. Kombinasi warna tersebut mewakili nilai hambatan dan toleransi yang menentukan batas penyimpangan nilai resistansi. Perbedaan nilai hasil perhitungan dan pengukuran dapat terjadi karena toleransi resistor, kondisi komponen, serta ketelitian alat ukur yang digunakan [51].

2.4.16. Fuse

Fuse atau sekering merupakan perangkat proteksi listrik yang berfungsi memutus rangkaian secara otomatis ketika terjadi arus berlebih atau hubung singkat. Komponen ini bekerja dengan melelehnya elemen penghantar di dalam fuse akibat panas yang timbul ketika arus melebihi nilai nominalnya, sehingga aliran listrik terputus dan

rangkaian terlindungi dari kerusakan [52]. Bentuk fisik komponen pengaman arus ini ditunjukkan pada Gambar 2.19.

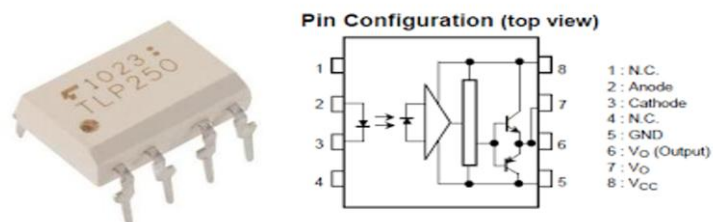


Gambar 2. 19. *Fuse* [53]

Berdasarkan Gambar 2.19, fuse berfungsi melindungi rangkaian dari arus berlebih. Fuse digunakan untuk melindungi peralatan listrik dan elektronik dari gangguan arus lebih, menjaga keandalan sistem, serta mencegah kerusakan komponen akibat kondisi abnormal. Pemilihan rating arus fuse harus disesuaikan dengan arus kerja normal agar fuse tetap aman saat operasi normal namun mampu memutus rangkaian dengan cepat saat terjadi gangguan.

2.4.17. Optocoupler TLP250

Optocoupler TLP250 merupakan salah satu komponen elektronika yang digunakan sebagai penghubung sinyal sekaligus isolator antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya. Komponen ini bekerja dengan prinsip konversi sinyal listrik menjadi cahaya dan kemudian dikembalikan lagi menjadi sinyal listrik pada sisi keluaran, sehingga tidak terjadi hubungan listrik secara langsung antara kedua rangkaian. TLP250 secara khusus dirancang sebagai driver untuk MOSFET, sehingga mampu mengubah sinyal PWM yang dihasilkan oleh mikrokontroler menjadi sinyal pulsa dengan tegangan yang lebih tinggi[54]. Bentuk fisik dan skematik dari IC opto-isolator ini ditunjukkan pada Gambar 2.20.



Gambar 2. 20. Gambar dan Skematik TLP250[54]

Berdasarkan Gambar 2.20, optocoupler TLP250 digunakan sebagai isolator antara rangkaian kontrol dan daya. Selain itu, penggunaan TLP250 juga memberikan

keuntungan berupa isolasi listrik antara sisi kontrol dan sisi beban. Hal ini sangat penting terutama pada sistem yang melibatkan beban induktif atau switching tegangan tinggi, karena dapat melindungi mikrokontroler dari gangguan seperti noise maupun lonjakan tegangan.

2.5. Pengukuran Tegangan

2.5.1. Error Pengukuran

Pengukuran tegangan merupakan proses untuk mengetahui besar tegangan pada suatu titik rangkaian. Pada sistem elektronika, pengukuran tegangan dilakukan untuk memastikan bahwa komponen memperoleh suplai sesuai dengan kebutuhan kerjanya. Tegangan yang terlalu rendah dapat menyebabkan komponen tidak bekerja stabil, sedangkan tegangan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada komponen.

Pada sistem pencampuran cat otomatis, pengukuran tegangan dilakukan pada beberapa bagian, seperti power supply 12 VDC, step down 5 VDC, input driver, gate source MOSFET, output pompa, relay, dan lampu indikator. Pengukuran dilakukan menggunakan multimeter digital pada mode DC Volt. Probe merah digunakan untuk mengukur titik positif, sedangkan probe hitam dihubungkan ke ground atau terminal negatif rangkaian. Hasil pengukuran tegangan tidak selalu sama persis dengan nilai standar atau nilai teori. Perbedaan tersebut dapat terjadi karena beberapa faktor, seperti kondisi catu daya, tahanan kabel, sambungan rangkaian, beban yang aktif, serta karakteristik alat ukur yang digunakan. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan error untuk mengetahui seberapa besar selisih antara nilai acuan dengan nilai hasil pengukuran.

Berdasarkan penelitian Putra dkk. pada pengujian sensor tegangan DC, hasil pengukuran dapat dianalisis dengan menghitung nilai selisih, error, dan akurasi. Perhitungan tersebut digunakan untuk mengetahui tingkat kedekatan hasil pengukuran terhadap nilai pembanding. Pada penelitian ini, konsep tersebut digunakan untuk membandingkan tegangan standar dengan tegangan hasil pengukuran pada sistem elektrikal alat.

Persentase error pengukuran tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Error}(\%) = \left| \frac{V_s - V_u}{V_s} \right| \times 100\% \quad (2.12)$$

Keterangan:

V_s = tegangan standar atau tegangan acuan

V_u = tegangan hasil pengukuran

Tanda mutlak digunakan agar nilai error tetap bernilai positif, baik tegangan hasil pengukuran lebih besar maupun lebih kecil dari nilai standar. Semakin kecil nilai error, maka semakin dekat hasil pengukuran terhadap nilai acuan. Sebaliknya, semakin besar nilai error, maka semakin besar penyimpangan tegangan yang terjadi pada rangkaian. Selain error, tingkat akurasi juga dapat dihitung untuk mengetahui persentase kedekatan hasil pengukuran terhadap nilai acuan.

Persamaan error ini digunakan pada pengujian tegangan elektrik untuk mengetahui apakah tegangan pada setiap titik pengukuran masih sesuai dengan kebutuhan kerja komponen. Dengan adanya perhitungan tersebut, hasil pengukuran tidak hanya ditampilkan dalam bentuk nilai tegangan, tetapi juga dapat dianalisis secara kuantitatif [55].

Selain menggunakan perhitungan error, hasil pengukuran tegangan juga dibandingkan dengan rentang tegangan kerja yang masih dapat diterima. Pada penelitian ini, rentang regulasi tegangan DC dari dokumen teknis power supply ATX digunakan sebagai acuan pembanding praktis. Acuan ini tidak menunjukkan bahwa power supply yang digunakan pada alat merupakan power supply ATX atau merek tertentu, tetapi digunakan sebagai referensi teknis untuk menilai apakah tegangan 5 VDC dan 12 VDC masih berada pada rentang kerja yang wajar.

Berdasarkan acuan tersebut, tegangan 5 VDC dinyatakan masih sesuai apabila berada pada rentang 4,75 V sampai 5,25 V. Sementara itu, tegangan 12 VDC dinyatakan masih sesuai apabila berada pada rentang 11,20 V sampai 12,60 V. Rentang tersebut digunakan sebagai pembanding dalam analisis hasil pengujian karena sistem

pencampuran cat otomatis menggunakan jalur tegangan 5 VDC untuk bagian kontrol dan jalur tegangan 12 VDC untuk beban utama [56].

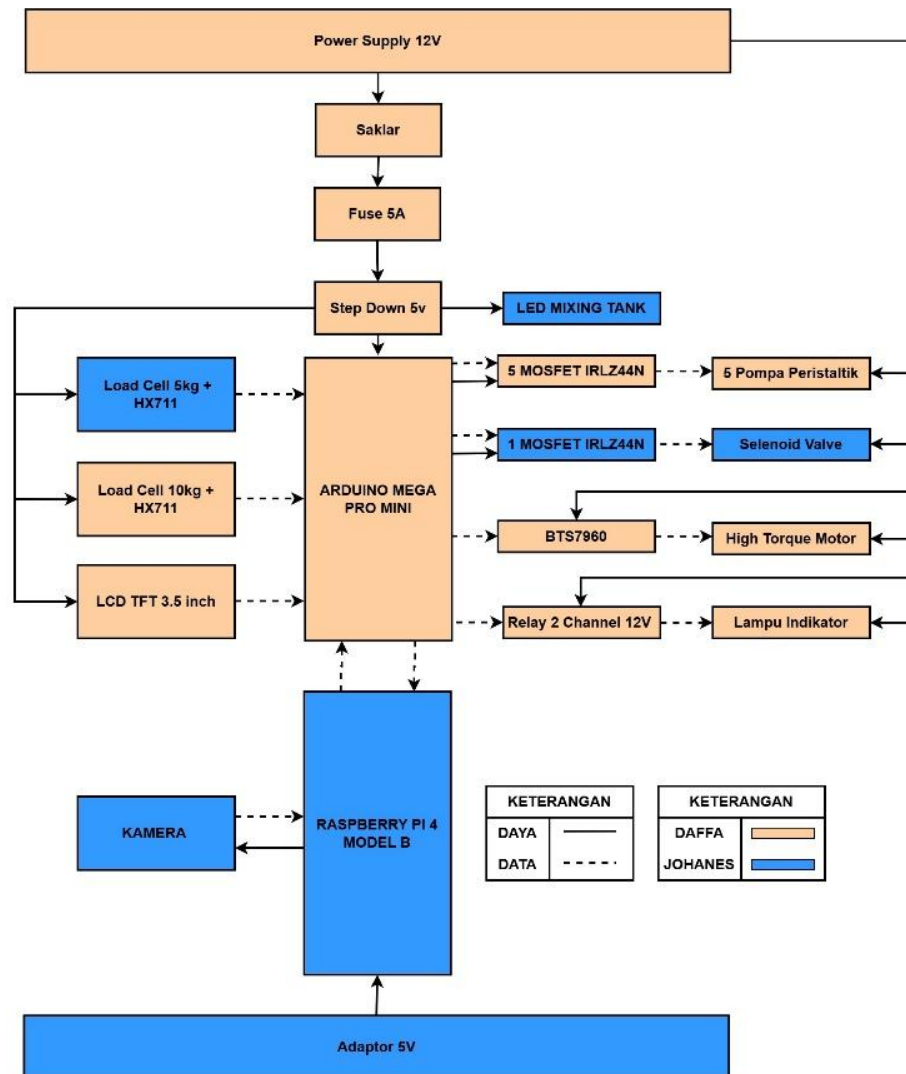
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Diagram blok

3.1.1. Diagram Blok sistem

Diagram blok sistem digunakan untuk menggambarkan hubungan kerja antar komponen dalam sistem pencampuran cat otomatis yang dirancang. Maka, diagram blok menjadi acuan dalam memahami cara kerja sistem sebelum dilakukan pembahasan lebih rinci pada setiap bagian. Rancangan sistem secara keseluruhan digambarkan dalam diagram blok pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1. Diagram Blok Sistem

(Dokumentasi Peneliti)

Berdasarkan Gambar 3.1, diagram blok menunjukkan hubungan kerja antar komponen pada sistem pencampuran cat otomatis. Sistem dikendalikan dengan arduino mega pro mini 2560 yang berfungsi sebagai pusat pemrosesan dan pengendali seluruh komponen. Mikrokontroler menerima input dari sensor, memproses data, dan mengatur aktuator sesuai logika kontrol yang telah diprogram. Sumber daya utama berasal dari power supply 12V yang menyuplai energi ke seluruh sistem. Tegangan ini melewati saklar sebagai pengendali utama ON/OFF sistem dan dilindungi oleh sekering (fuse) 5A untuk mencegah kerusakan akibat arus berlebih. Tegangan 12V kemudian diturunkan menjadi 5V menggunakan step down converter untuk memenuhi kebutuhan daya rangkaian logika dan sensor. Pengukuran massa dilakukan menggunakan dua *load cell* yang terhubung dengan modul HX711. Sensor ini berfungsi membaca massa cairan yang ditampung secara real time sehingga sistem dapat menghentikan pengisian saat massa target tercapai dan sebagai informasi pengukuran hasil akhir. Antarmuka pengguna menggunakan LCD TFT 3.5 inci *Touchscreen* yang dapat di gunakan untuk memilih warna, memulai proses pencampuran, dan memantau status sistem.

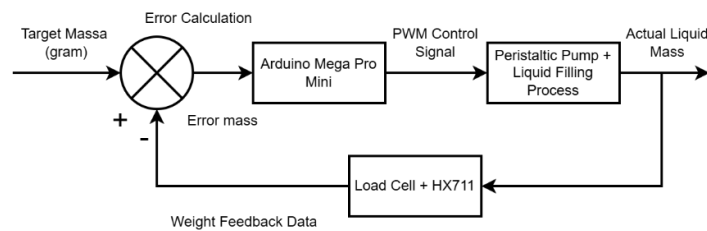
Pada bagian aktuator, sistem menggunakan lima pompa peristaltik DC yang dikendalikan melalui MOSFET IRLZ44N. MOSFET berfungsi sebagai saklar elektronik yang memungkinkan pengaturan kecepatan pompa menggunakan sinyal PWM dari mikrokontroler. Pengaturan ini menentukan debit aliran cairan yang keluar dari masing-masing pompa. Proses pencampuran dilakukan oleh motor DC torsi tinggi yang dikendalikan oleh driver BTS7960. Driver ini dapat melakukan pengendalian motor berarus besar secara stabil dan aman. Sistem juga dilengkapi relay 2 channel 12V untuk mengontrol LED. LED indikator merah dan hijau digunakan sebagai penanda status operasi sistem, seperti proses berjalan atau proses selesai.

Pada bagian terakhir terdapat Rapberry PI 4B yang digunakan sebagai pemrosesan pengoreksian nilai HSV, lalu di kirim dan di terima menggunakan USB Serial ke arduino dan Rapberry PI 4B mendapatkan daya sumber dari adaptor AC - DC 5V/3A. Pada gambar 3.1 terdapat warna berbeda pada diagram blok yaitu digunakan sebagai pembeda dari penelitian ini dengan penelitian subsistem

3.1.2. Blok Sensor (*Feedback Closed Loop System*)

Diagram blok ini digunakan untuk menggambarkan mekanisme pengendalian tertutup (*closed-loop control*) pada sistem pencampuran cat otomatis. Diagram ini menunjukkan bagaimana mikrokontroler mengendalikan proses pengisian cairan berdasarkan massa aktual yang diukur secara *realtime*, sehingga pengisian dapat dihentikan tepat saat target tercapai. Dengan adanya umpan balik dari sensor massa, sistem mampu meningkatkan presisi dan konsistensi hasil pencampuran.

Diagram blok menunjukkan mekanisme pengendalian tertutup pada sistem pengisian cairan berbasis massa. Sistem bekerja dengan membandingkan massa target dengan massa aktual yang terukur secara *realtime* untuk memastikan pengisian berlangsung secara presisi. Konsep pengendalian umpan balik yang diterapkan pada sistem digambarkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2. Diagram blok *Closed Loop System*
(Dokumentasi Peneliti)

Berdasarkan Gambar 3.2, sistem bekerja menggunakan umpan balik untuk meningkatkan akurasi proses pencampuran. Proses dimulai dari input target massa (gram) yang menunjukkan jumlah cairan yang harus diisi ke dalam wadah. Nilai ini masuk ke blok *error calculation*, yang berfungsi membandingkan massa target dengan massa aktual hasil pembacaan sensor. Selisih antara kedua nilai tersebut disebut error massa, yang menunjukkan seberapa jauh kondisi aktual dari nilai yang diinginkan. Nilai error massa kemudian diproses oleh arduino mega pro mini sebagai unit pengendali utama. Berdasarkan nilai error yang diterima, mikrokontroler menghasilkan sinyal kontrol PWM untuk mengatur kecepatan pompa.

Sinyal PWM tersebut mengendalikan pompa peristaltik yang menjalankan proses fisik pengisian cairan ke dalam wadah, yang direpresentasikan sebagai dan *liquid*

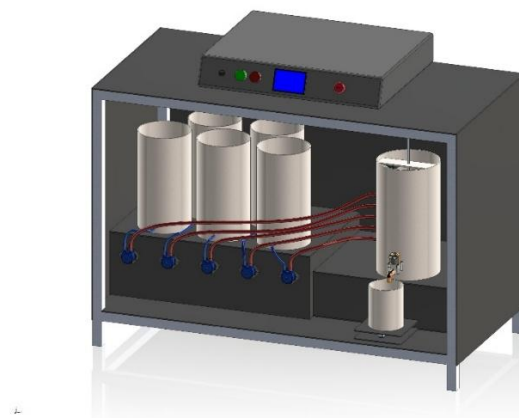
filling process. Selama proses ini berlangsung, massa cairan dalam wadah meningkat dan menghasilkan output berupa actual liquid mass. Massa aktual diukur menggunakan *load cell* yang terhubung dengan modul HX711. *load cell* mendeteksi perubahan gaya akibat penambahan massa, kemudian HX711 memperkuat serta mengonversi sinyal analog menjadi data digital. Data ini dikirim kembali ke sistem sebagai *weight feedback* data. Umpan balik massa tersebut digunakan kembali dalam proses perhitungan error untuk menentukan apakah pengisian harus dilanjutkan, diperlambat, atau dihentikan. Mekanisme ini membentuk sistem kendali tertutup yang memungkinkan pengisian cairan dilakukan secara akurat tanpa bergantung pada estimasi waktu atau volume.

3.2. Perancangan *Hardware*

3.2.1. Gambar 3D

3.2.1 1. Isometric

Tampilan isometrik digunakan untuk memperlihatkan rancangan keseluruhan sistem pencampuran cat otomatis dalam bentuk tiga dimensi. Pada tampilan ini, susunan komponen utama serta hubungan antar bagian dalam sistem dapat terlihat dengan lebih jelas sehingga memudahkan dalam memahami konsep perancangan alat. Rancangan bentuk alat secara isometrik ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3. Isometric

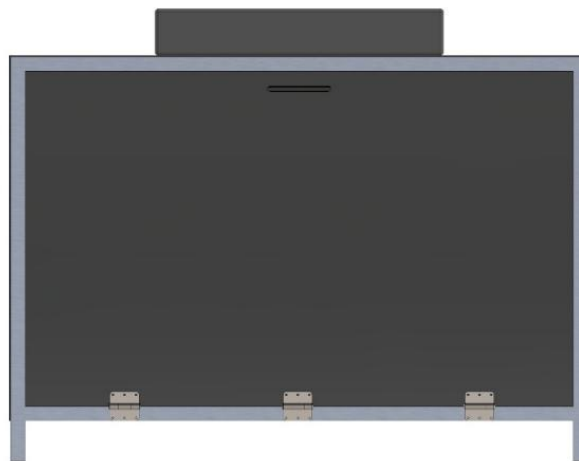
(Dokumentasi Peneliti)

Berdasarkan Gambar 3.3, tampilan isometrik menunjukkan rancangan keseluruhan alat. Sistem terdiri dari beberapa komponen utama yaitu tabung penyimpanan warna,

pompa peristaltik, tabung pencampuran, serta unit kontrol. Tabung penyimpanan berfungsi sebagai wadah cat warna dasar yang akan dialirkan menuju tabung pencampuran melalui selang dan pompa. Proses pencampuran dilakukan pada tabung mixing yang berada di sisi kanan sistem. Sementara itu, pada bagian atas terdapat unit kontrol yang berfungsi untuk mengatur kerja pompa, membaca data sensor, serta mengendalikan keseluruhan proses pencampuran secara otomatis.

3.2.1 2. Tampak Belakang

Tampilan tampak belakang digunakan untuk memperlihatkan bagian belakang dari rancangan sistem pencampuran cat otomatis. Tampilan ini membantu menunjukkan struktur rangka serta area akses yang digunakan untuk perawatan dan instalasi komponen di dalam sistem. Rancangan tampak belakang dari alat ditunjukkan pada Gambar 3.4.



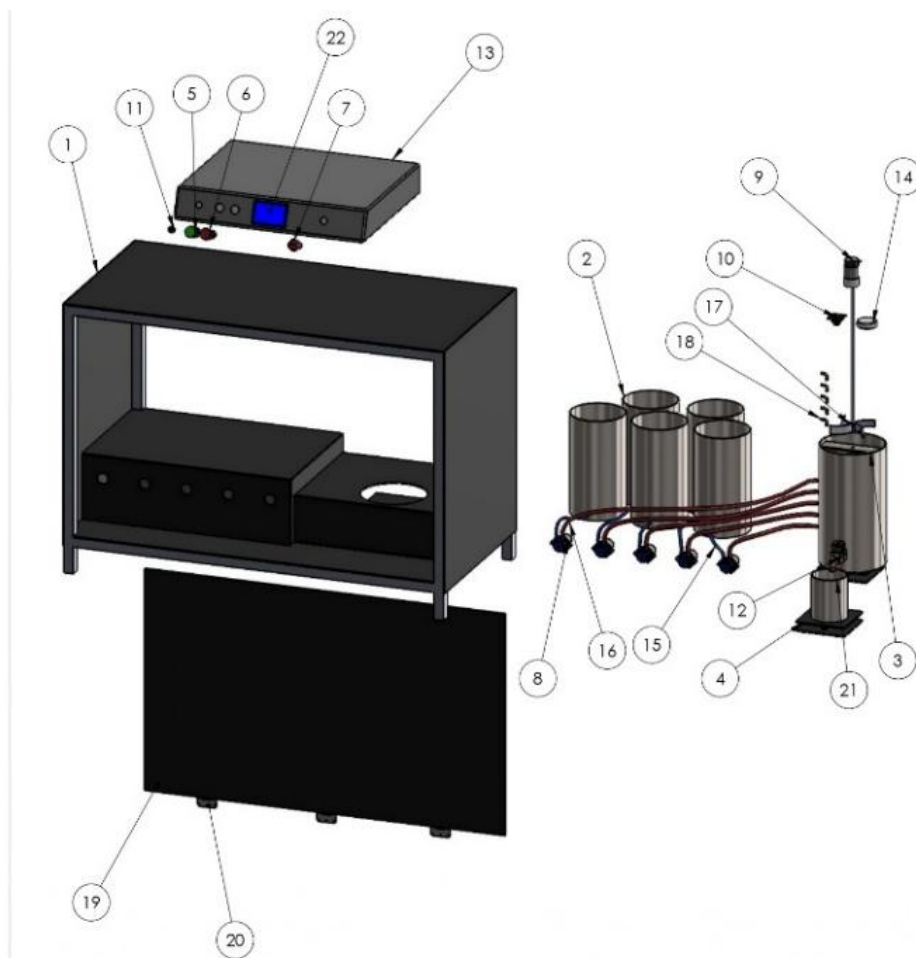
Gambar 3. 4. Tampak Belakang
(Dokumentasi Peneliti)

Berdasarkan Gambar 3.4, tampak belakang memperlihatkan susunan komponen pada bagian belakang alat. Bagian belakang sistem dirancang dengan panel penutup yang dapat dibuka untuk memudahkan proses perawatan, perbaikan, maupun pengaturan komponen internal seperti rangkaian elektronik, jalur kabel, serta sistem kontrol. Desain ini bertujuan agar akses terhadap komponen di dalam alat dapat

dilakukan dengan lebih mudah tanpa harus membongkar keseluruhan struktur perangkat.

3.2.1 3. Penamaan Komponen

Penamaan komponen dilakukan untuk memberikan identifikasi terhadap setiap bagian yang terdapat pada sistem pencampuran cat otomatis. Melalui penomoran komponen pada gambar, setiap bagian sistem dapat dikenali dengan lebih mudah sehingga mempermudah proses perancangan, perakitan, serta analisis kerja alat. Penamaan tiap bagian komponen pada rancangan 3D ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5. Penamaan Komponen 3D
(Dokumentasi Peneliti)

Keterangan :

Tabel 3. 1. keterangan *hardware* 3D

No	Nama Komponen	Jumlah
1	Rangka	1
2	Tabung kecil	5
3	Tabung besar	1
4	<i>load cell</i>	2
5	Pilot Lamp Hijau	1
6	Pilot Lamp Merah	1
7	Emergency stop button	1
8	Pompa peristaltic	5
9	Motor DC	1
10	Camera	1
11	Button ON/OFF	1
12	Solenoid valve	1
13	Box Control	1
14	Lampu	1
15	Selang in	5
16	Selang out	5
17	AS Pengaduk	1
18	Pintu Belakang	1
19	Engsel	3
20	Kaleng penampung	1
21	LCD	1

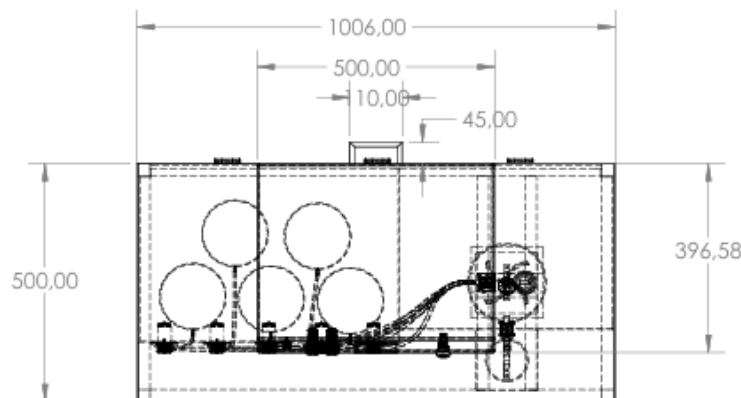
Berdasarkan Gambar 3.5 dan Berdasarkan Tabel 3.1, setiap komponen utama pada rancangan 3D telah diberi identitas untuk memudahkan pembahasan. Setiap komponen pada sistem diberikan nomor yang mengacu pada tabel keterangan komponen. Komponen utama pada sistem ini meliputi rangka alat sebagai struktur penopang, tabung penyimpanan cat, pompa peristaltik sebagai penggerak aliran cairan, selang penghubung, serta tabung pencampuran. Selain itu terdapat komponen pendukung

seperti *load cell* untuk pengukuran massa, motor pengaduk pada tabung pencampuran, serta katup solenoid yang berfungsi untuk mengatur aliran cairan.

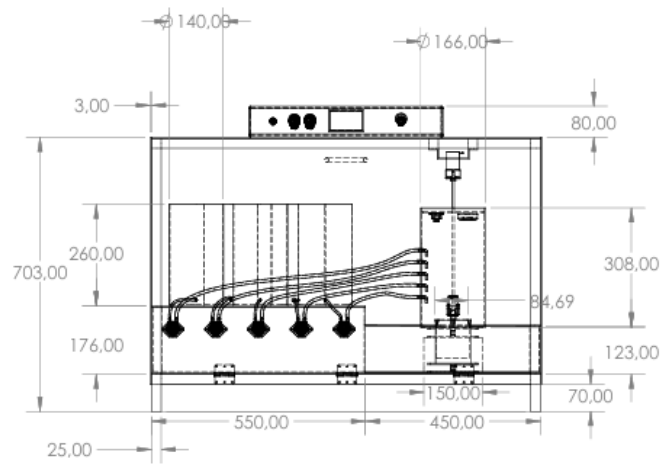
Pada bagian kontrol terdapat beberapa komponen elektronik seperti arduino, raspberry Pi, modul LCD, tombol kontrol, serta lampu indikator yang digunakan untuk mengoperasikan dan memantau kondisi sistem. Dengan adanya penamaan komponen ini, setiap bagian dalam sistem dapat diidentifikasi secara sistematis sehingga memudahkan dalam proses implementasi maupun pemeliharaan perangkat.

3.2.1 4. Ukuran Desain

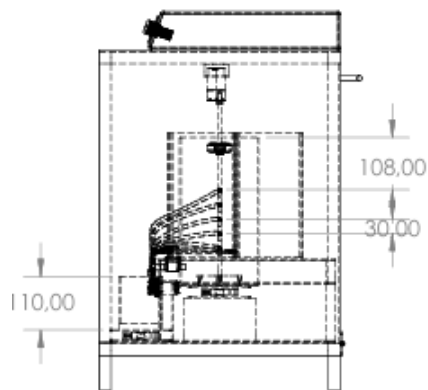
Dimensi perancangan digunakan untuk menunjukkan ukuran fisik dari sistem pencampuran cat otomatis yang dirancang. Melalui gambar teknik ini, ukuran panjang, lebar, dan tinggi dari setiap bagian alat dapat diketahui secara jelas sehingga memudahkan proses pembuatan rangka serta penempatan komponen pada sistem. Ukuran dimensi alat pada tiap sisi ditampilkan pada Gambar 3.6.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. 6. (a) Ukuran tampak atas, (b) Ukuran tampak depan, (c) Ukuran tampak samping

(Dokumentasi Peneliti)

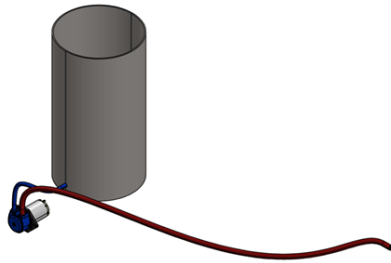
Berdasarkan Gambar 3.6, ditunjukkan dimensi utama kerangka alat dari berbagai sisi. Sistem dirancang dengan panjang sekitar 1006 mm, lebar sekitar 500 mm, dan tinggi rangka sekitar 703 mm. Dimensi ini disesuaikan dengan kebutuhan ruang untuk menempatkan beberapa komponen utama seperti tabung penyimpanan cat warna dasar dengan kapasitas 2kg dan *mixing tank* berkapasitas 2kg, pompa peristaltik, selang

distribusi, serta tabung pencampuran. Selain itu, unit kontrol ditempatkan pada bagian atas rangka untuk memudahkan pengoperasian dan pemantauan sistem.

Penentuan dimensi ini bertujuan agar seluruh komponen dapat tersusun secara rapi, memudahkan proses perawatan, serta memastikan sistem tetap stabil saat proses pencampuran berlangsung. Desain ukuran juga mempertimbangkan efisiensi ruang serta kemudahan dalam proses perakitan alat.

3.2.1 5. Tabung Pendistribusi warna

Sistem pendistribusian warna merupakan bagian penting dalam proses pencampuran otomatis. Pada rancangan ini digunakan wadah sumber berkapasitas 2 liter sebagai penampung cairan warna, yang kemudian dialirkan menuju tangki pencampuran (*mixing tank*) menggunakan pompa peristaltik. Rancangan bagian pendistribusi warna pada alat ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7. Tampak pendistribusi warna
(Dokumentasi Peneliti)

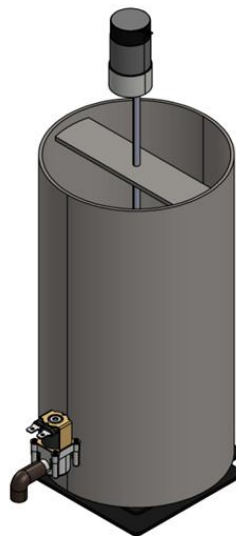
Berdasarkan Gambar 3.7, sistem pendistribusian warna dirancang untuk menyalurkan cat menuju *mixing tank*. Cairan warna disimpan dalam wadah utama berkapasitas 2 liter berjumlah 5 buah dengan warna merah, kuning, biru, hitam, putih. Dari wadah ini, cairan dialirkan melalui selang fleksibel yang terhubung langsung dengan pompa peristaltik.

Cairan yang telah dipompa kemudian masuk ke dalam *mixing tank* sebagai tempat pencampuran akhir. Pada tahap ini, sistem dapat mengombinasikan beberapa sumber warna berbeda sebelum dilakukan proses pengadukan. Integrasi antara reservoir 2 liter, pompa peristaltik, dan *mixing tank* dapat melakukan distribusi warna berjalan secara

otomatis, terukur, dan konsisten sesuai parameter yang telah ditentukan dalam sistem kontrol.

3.2.1 6. Tabung Proses *Mixing tank*

Proses pencampuran (*mixing*) merupakan tahap inti dalam sistem pencampuran warna otomatis karena menentukan homogenitas dan kualitas hasil akhir. Setelah cairan warna didistribusikan menggunakan pompa peristaltik, seluruh fluida dikumpulkan dalam satu wadah yaitu *mixing tank*. Rancangan tabung tempat proses pencampuran berlangsung ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3. 8. Tabung Proses *Mixing tank*

Berdasarkan Gambar 3.8, *mixing tank* digunakan sebagai tempat proses pencampuran cat berlangsung. *mixing tank* dirancang berbentuk silinder vertikal yang dilengkapi motor penggerak di bagian atas. Motor ini terhubung dengan poros vertikal yang masuk ke dalam tangki dan dilengkapi dengan impeller (pengaduk). Ketika motor berputar, impeller akan menghasilkan aliran turbulen di dalam cairan sehingga mempercepat proses pencampuran antar warna. Pada bagian bawah tangki terdapat katup (*valve*) sebagai saluran keluaran. Katup ini berfungsi untuk mengalirkan hasil campuran setelah proses *mixing* selesai. Desain outlet di bagian bawah memungkinkan cairan keluar secara maksimal tanpa menyisakan residu dalam jumlah besar di dalam tangki.

3.2.2. Hasil Realisasi Perangkat Keras

3.2.2.1. Realisasi Kerangka Alat

Kerangka alat merupakan bagian utama yang berfungsi sebagai penopang seluruh komponen pada sistem pencampuran cat otomatis. Kerangka direalisasikan berdasarkan desain yang telah dibuat pada tahap perancangan dengan mempertimbangkan kekuatan struktur, kestabilan alat, kemudahan pemasangan komponen, serta kemudahan dalam proses perawatan.

Pada tugas akhir ini, kerangka dibuat menggunakan kombinasi besi hollow berukuran 2 cm × 4 cm sebagai rangka utama dan besi hollow 2 cm × 2 cm sebagai penguat struktur serta dudukan beberapa komponen. Penggunaan besi hollow 2 cm × 4 cm dipilih karena memiliki kekuatan yang cukup untuk menopang beban tabung penyimpanan cat, sistem pencampuran, dan komponen kontrol. Sementara itu, besi hollow 2 cm × 2 cm digunakan pada beberapa bagian yang tidak menerima beban utama sehingga penggunaan material menjadi lebih efisien tanpa mengurangi kekuatan konstruksi secara keseluruhan.

Berdasarkan hasil realisasi, kerangka memiliki dimensi keseluruhan sebesar 101 cm × 50 cm × 70 cm (panjang × lebar × tinggi). Dimensi tersebut disesuaikan dengan kebutuhan ruang pemasangan komponen sehingga seluruh bagian sistem dapat ditempatkan secara teratur dan mudah diakses selama proses pengoperasian maupun perawatan. Hasil realisasi kerangka alat yang telah dibuat ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 9. Realisasi Kerangka Alat

Untuk memperjelas spesifikasi kerangka yang digunakan, dimensi kerangka ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2. Dimensi Kerangka Alat

Parameter	Ukuran
Panjang Kerangka	101 cm
Lebar Kerangka	50 cm
Tinggi Kerangka	70 cm
Material Rangka Utama	Besi Hollow 2 cm × 4 cm
Material Penguat	Besi Hollow 2 cm × 2 cm

Berdasarkan Gambar 3.19 dan Berdasarkan Tabel 3.2, terlihat bahwa kerangka tersusun atas berupa balok memanjang dan melintang yang saling terhubung membentuk struktur yang kokoh. Pada bagian atas kerangka terdapat area yang digunakan sebagai tempat pemasangan tabung penyimpanan warna dan panel kontrol. Bagian tengah digunakan sebagai area pemasangan sistem pencampuran dan *load cell*, sedangkan bagian bawah dimanfaatkan sebagai ruang penempatan komponen pendukung serta jalur instalasi kabel dan selang.

Keberadaan balok melintang pada beberapa sisi kerangka berfungsi sebagai pengaku struktur untuk meningkatkan kekakuan konstruksi. Pengaku tersebut membantu mendistribusikan beban secara lebih merata sehingga risiko terjadinya lendutan pada kerangka dapat dikurangi. Selain itu, penggunaan konstruksi terbuka memudahkan proses pemasangan, inspeksi, maupun perawatan komponen apabila terjadi kerusakan selama alat digunakan.

4.2.1.1. Realisasi Cover dan Dudukan Alat

Hasil realisasi menunjukkan bahwa cover dan dudukan mampu menjalankan fungsinya sesuai dengan kebutuhan sistem. Cover yang dipasang pada beberapa sisi alat memberikan perlindungan terhadap komponen internal sekaligus meningkatkan keamanan selama proses penggunaan.

Keberadaan pintu belakang dan panel kontrol berengsel agar mudah dalam proses inspeksi serta pemeliharaan alat. Akses terhadap komponen elektronika dan jalur pengkabelan dapat dilakukan dengan lebih cepat tanpa harus melepas keseluruhan cover. Desain ini juga membantu mengurangi risiko kerusakan pada cover akibat proses bongkar pasang yang berulang sehingga umur pakai konstruksi dapat lebih terjaga.

Dudukan utama dengan ketebalan 18 mm memberikan kekuatan yang dapat untuk menopang komponen yang memiliki beban relatif besar, seperti lima tabung penyimpanan cat warna dasar dengan kapasitas masing-masing sekitar 2 liter. Sementara itu, dudukan tabung mixing dengan ketebalan 12 mm mampu menjaga posisi tabung tetap stabil selama proses pencampuran berlangsung. Stabilitas tersebut penting untuk mendukung kinerja sistem penimbangan berbasis *load cell* yang digunakan pada alat.

3.2.2.2. Realisasi Penempatan Komponen

Penempatan komponen pada alat pencampuran cat otomatis dilakukan dengan mempertimbangkan aspek fungsional, kemudahan perawatan, serta kestabilan proses penimbangan dan pencampuran. Tata letak setiap komponen disusun agar aliran cat, jalur kabel, dan proses kontrol dapat berjalan secara terintegrasi dalam satu sistem.

Sistem penimbangan terdiri dari dua buah *load cell* yang memiliki fungsi berbeda. *load cell* pertama digunakan untuk pengukuran berat tabung suplai dan memiliki kapasitas maksimum 10 kg. *load cell* ini dipasang pada dudukan khusus sehingga mampu mengukur perubahan massa cairan yang keluar dari tabung penyimpanan. Sementara itu, *load cell* kedua digunakan sebagai sensor utama pada sistem pencampuran dengan kapasitas maksimum 10 kg. *load cell* tersebut dipasang pada bagian tengah alat menggunakan konstruksi dudukan yang terdiri dari papan penopang berbahan tripleks dengan penyangga tambahan hasil cetak 3D printing setinggi 1 cm. Bagian dasar dudukan menggunakan tripleks dengan ketebalan 18 mm, sedangkan bagian atas menggunakan tripleks dengan ketebalan 12 mm. Konstruksi tersebut dirancang untuk menjaga kestabilan pembacaan sensor selama proses pengisian dan pencampuran berlangsung.

Tabung penyimpanan cat warna dasar ditempatkan pada bagian atas alat dengan jumlah lima buah tabung. Susunan tabung dibuat dalam dua baris, yaitu tiga tabung pada bagian depan dan dua tabung pada bagian belakang. Masing-masing tabung memiliki kapasitas sekitar 2 liter dan berfungsi sebagai tempat penyimpanan warna dasar yang digunakan dalam proses pencampuran. Setiap tabung dihubungkan menggunakan selang berukuran $3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ yang kemudian disambungkan dengan selang berukuran $4 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ menuju motor peristaltik. Selanjutnya, motor peristaltik mengalirkan cat menuju tabung pencampuran sesuai perintah yang diberikan oleh sistem kontrol. Motor peristaltik dipasang di dekat area tabung penyimpanan untuk mempermudah jalur distribusi cairan dan mengurangi panjang selang yang digunakan. Penempatan tersebut membantu menjaga kestabilan aliran cat sekaligus mempermudah proses pemasangan dan perawatan komponen.

Tabung pencampuran (*mixing tank*) ditempatkan pada bagian tengah alat tepat di atas *load cell* 10 kg. Tabung ini memiliki kapasitas maksimum sekitar 2 kg dengan diameter 13 cm dan tinggi 30 cm. Pada bagian atas tabung dibuat lubang sebagai jalur pemasangan motor DC yang digunakan sebagai pengaduk. Posisi tersebut memungkinkan proses pengadukan berlangsung secara langsung di dalam tabung sehingga campuran warna dapat tercampur secara lebih merata.

Selain sistem pengaduk, pada bagian dalam area tabung pencampuran juga dipasang kamera dan lampu LED. Kamera digunakan untuk proses pengambilan citra warna hasil pencampuran, sedangkan LED berfungsi sebagai sumber pencahayaan agar kondisi pencahayaan saat pengambilan gambar tetap stabil. Dengan pencahayaan yang konsisten, proses analisis warna dapat dilakukan dengan lebih baik dan menghasilkan data yang lebih akurat.

Komponen kontrol dan antarmuka ditempatkan pada panel bagian atas alat. Komponen yang dipasang pada panel tersebut meliputi LCD TFT, indikator LED, push button, saklar utama, PCB kontrol, serta berbagai komponen elektronika pendukung lainnya. Penempatan seluruh komponen kontrol pada satu panel bertujuan untuk mempermudah proses pengoperasian, pemantauan sistem, serta pemeliharaan apabila terjadi gangguan pada alat. Selain itu, panel yang menggunakan sistem bukaan

berengsel dapat mengakses komponen elektronika agar mudah dalam sistem pemantauan komponen maintenance serta perbaikan kerusakan.

3.2.2.3. Realisasi Tabung Penyimpanan Warna dan Jalur Selang

Tabung penyimpanan warna pada alat ini digunakan sebagai tempat penampung cat sebelum dialirkan menuju *mixing tank*. Pada realisasi alat, tabung penyimpanan dibuat sebanyak lima buah yang masing-masing digunakan untuk menampung warna dasar, yaitu merah, kuning, biru, hitam, dan putih. Setiap tabung ditempatkan pada bagian kiri rangka alat dengan posisi yang disusun tiga buah di letakan di deoan dan dua buah di letakan di belakang agar mudah diisi ulang dan mudah diperiksa saat proses pengujian berlangsung.

Setiap tabung dihubungkan menggunakan selang berukuran 3 mm × 5 mm yang kemudian disambungkan dengan selang berukuran 4 mm × 6 mm menuju motor peristaltik. Selanjutnya, motor peristaltik mengalirkan cat menuju tabung pencampuran sesuai perintah yang diberikan oleh sistem kontrol. Motor peristaltik dipasang di dekat area tabung penyimpanan untuk mempermudah jalur distribusi cairan dan mengurangi panjang selang yang digunakan. Penempatan tersebut membantu menjaga kestabilan aliran cat sekaligus mempermudah proses pemasangan dan perawatan komponen.

Jalur selang dibuat serapi mungkin untuk menjaga kestabilan aliran cat serta mengurangi sumbatan aliran akibat tertumpuknya antar selang. Penataan selang juga dibuat tidak terlalu menekuk agar aliran cat tidak terhambat saat pompa bekerja. Selain itu, setiap selang dipasang mengikuti posisi pompa dan arah masuk ke *mixing tank* sehingga proses distribusi cat dapat berjalan lebih teratur dan pada bagian sambungan selang, digunakan lem sealant khusus plastik untuk memperkuat sambungan agar tidak mudah lepas saat pompa bekerja. Penggunaan lem lem sealant juga bertujuan untuk mengurangi risiko kebocoran pada jalur aliran cat, terutama pada bagian yang terhubung dengan fitting atau lubang keluaran tabung. lem diaplikasikan pada bagian luar sambungan sehingga tidak menghambat aliran cat di dalam selang.

3.2.2.4. Realisasi *Mixing tank* dan Sistem Pengaduk

Mixing tank pada alat ini berfungsi sebagai wadah utama untuk menampung dan mencampurkan cat setelah proses penakaran dari masing-masing pompa selesai

dilakukan. *mixing tank* yang digunakan memiliki diameter 13 cm dan tinggi 30 cm, dengan kapasitas pencampuran hingga 2 kg cat.

Pada bagian atas *mixing tank* dipasang penutup yang diberi lubang pada bagian tengah. Lubang tersebut digunakan sebagai jalur masuk shaft pengaduk agar shaft dapat terhubung langsung dengan impeller di dalam *mixing tank*. Selain sebagaiudukan jalur shaft, penutup juga berfungsi untuk mengurangi masuknya cahaya dari luar ke dalam wadah pencampuran. Hal ini diperlukan karena sistem dilengkapi dengan kamera untuk proses koreksi citra warna, sehingga pencahayaan dari luar perlu dikurangi agar tidak mengganggu hasil pembacaan warna.

Sistem pengaduk menggunakan shaft dengan panjang 32 cm yang terhubung dengan impeller berdiameter 9 cm. Impeller tersebut ditempatkan di dalam *mixing tank* untuk membantu proses pencampuran cat agar warna dan tekstur dapat menyatu secara merata. Saat motor pengaduk bekerja, shaft akan memutar impeller sehingga cat di dalam wadah mengalami pergerakan dan proses pencampuran dapat berlangsung lebih cepat. Selain sistem pengaduk, pada bagian *mixing tank* juga dipasang kamera dan LED sebagai pendukung proses pengamatan warna. Kamera digunakan untuk membaca hasil warna campuran, sedangkan LED berfungsi sebagai sumber pencahayaan di dalam area pengamatan. Kamera dan LED ditempatkan pada bracket yang dibuat menggunakan 3D printing agar posisi komponen lebih rapi, tetap, dan sesuai dengan arah pengambilan citra.

Pada bagian bawah *mixing tank* dipasang papan dudukan yang dilengkapi dengan *load cell*. *load cell* digunakan untuk membaca massa cat yang berada di dalam *mixing tank* secara langsung. Dengan adanya *load cell*, sistem dapat mengetahui jumlah massa campuran yang masuk ke wadah pencampuran dan mendukung proses pengukuran berbasis *Gravimetric Dosing*.

3.2.2.5. Realisasi Sistem Pompa Peristaltik

Realisasi sistem pompa peristaltik pada alat pencampuran cat otomatis menggunakan pompa tipe NKP-DC-S10B sebanyak lima unit. Pompa ini digunakan sebagai aktuator untuk menyalurkan cat dasar dari tabung penyimpanan menuju *mixing tank*. Setiap pompa memiliki jalur warna masing-masing, sehingga proses pengeluaran

cat dapat dilakukan secara terpisah sesuai komposisi warna yang telah ditentukan pada sistem.

Pompa peristaltik ditempatkan pada bagian sebelah kiri rangka apabila dilihat dari tampak depan alat. Penempatan ini dibuat agar susunan pompa lebih mudah dijangkau, memudahkan pemasangan selang, serta mempermudah proses perawatan apabila terjadi penyumbatan atau penggantian selang. Posisi pemasangan pompa peristaltik pada alat ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3. 10. Penempatan pompa peristaltik

Berdasarkan Gambar 3.10, pompa peristaltik dipasang sesuai jalur distribusi masing-masing warna. Pada sistem ini, pembagian channel pompa terdiri dari M1 untuk warna biru, M2 untuk warna hitam, M3 untuk warna kuning, M4 untuk warna putih, dan M5 untuk warna merah. Setiap pompa dihubungkan dengan selang masuk dari tabung warna dasar, kemudian selang keluaran diarahkan menuju *mixing tank*. Dengan jalur tersebut, cat dari masing-masing tabung dapat dialirkan menuju wadah pencampuran sesuai urutan kerja sistem. Pompa peristaltik bekerja menggunakan tegangan 12 VDC. Karena pompa membutuhkan arus yang lebih besar dibandingkan kemampuan pin arduino, maka pengendalian pompa dilakukan menggunakan rangkaian driver berbasis MOSFET.

3.2.2.6. Realisasi Sistem Sensor Berat *load cell* dan HX711

Realisasi sistem sensor berat pada alat pencampuran cat otomatis menggunakan *load cell* yang dipasang pada bagian bawah *mixing tank*. *load cell* berfungsi sebagai sensor pembaca massa cat yang masuk ke dalam wadah pencampuran. Pada sistem ini,

beban dari *mixing tank* tidak ditopang oleh seluruh permukaan dudukan, tetapi difokuskan pada bagian tengah yang langsung berhubungan dengan area pembacaan *load cell*.

load cell dipasang secara single point pada bagian bawah *mixing tank*. Salah satu sisi *load cell* dipasang tetap pada rangka, sedangkan sisi lainnya menerima gaya dari tumpuan *mixing tank*. Susunan tersebut dibuat agar beban diteruskan ke titik pembebanan sensor tanpa tertahan oleh frame samping. Pada bagian mekanik, dudukan *mixing tank* dibuat menggunakan tumpuan berbentuk lingkaran di bagian tengah dengan diameter 13 cm. Ukuran tersebut disesuaikan dengan lebar dasar *mixing tank*, sehingga beban dari wadah pencampuran dapat diteruskan secara lebih terpusat ke *load cell*. Tumpuan tengah ini memiliki ketebalan 18 mm agar cukup kuat menopang beban *mixing tank* beserta cat di dalamnya saat proses pencampuran berlangsung. Hasil pemasangan *load cell* pada *mixing tank* ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3. 11. Realisasi *load cell* sebagai sensor pembaca massa *mixing tank*

Berdasarkan Gambar 3.11, *load cell* dipasang sebagai sensor pengukur massa pada *mixing tank*. Di bagian luar tumpuan tengah terdapat frame samping sebagai struktur pendukung. Frame ini memiliki ukuran total $35 \text{ cm} \times 46,5 \text{ cm}$ dengan ketebalan 3 mm. Pada bagian tengah frame dibuat lubang berdiameter 14 cm agar tumpuan lingkaran 13 cm dapat bergerak dan menerima beban secara terpisah dari rangka luar. Dengan susunan tersebut, *load cell* hanya menopang bagian lingkaran tengah, sedangkan frame samping berfungsi sebagai penahan dan dudukan mekanik di sekelilingnya.

Konfigurasi ini dibuat agar beban *mixing tank* lebih terarah pada titik pembacaan *load cell*. Jika seluruh bidang dudukan ikut menopang beban, maka sebagian beban dapat tersebar ke rangka dan menyebabkan pembacaan massa menjadi kurang optimal. Oleh karena itu, penggunaan tumpuan tengah membantu memusatkan beban sehingga perubahan massa cat yang masuk ke *mixing tank* dapat terbaca lebih baik oleh sensor. Posisi *load cell* di bagian bawah *mixing tank* secara lebih detail ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3. 12. Penempatan *load cell* bagian bawah *mixing tank*

Berdasarkan Gambar 3.12, posisi *load cell* ditempatkan pada bagian bawah *mixing tank* agar mampu membaca massa secara langsung. Saat cat dialirkan ke dalam *mixing tank*, massa pada tumpuan tengah akan bertambah. Perubahan beban tersebut diterima oleh *load cell*, kemudian sinyal keluarannya dikirim ke modul HX711. Modul HX711 digunakan sebagai penguat sinyal sekaligus konverter analog ke digital karena sinyal keluaran *load cell* sangat kecil dan tidak dapat dibaca langsung oleh arduino. Setelah diproses oleh HX711, data dikirimkan ke arduino mega pro mini untuk diolah menjadi nilai massa dalam satuan gram.

3.3. Spesifikasi dan Fitur

3.3.1 Tabung Penyimpanan Warna

Tabung penyimpanan digunakan untuk menampung cat warna dasar yang akan digunakan dalam proses pencampuran. Setiap tabung dihubungkan dengan pompa peristaltik yang dikendalikan oleh sistem kontrol untuk mengeluarkan cat sesuai dengan komposisi yang dibutuhkan. Pompa peristaltik digunakan karena mampu

mengalirkan cairan dengan presisi serta mencegah kontaminasi antara pompa dan cairan.

Spesifikasi utama:

Tabel 3. 3. Spesifikasi tabung penyimpanan warna

Spesifikasi tabung penyimpanan warna yang digunakan pada sistem pencampuran cat ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Nama	Spesifikasi
Kapasitas tabung	2 kg cat per tabung
Jumlah tabung	5 tabung warna (Hitam, Putih, Merah, Kuning, Biru)
Material tabung	plastik
Aktuator pengeluaran	pompa peristaltik DC 12V
Debit pompa	5.2 ~ 90ml/min
Diameter selang	3 × 5 mm 4 × 6 mm

3.3.2. Tabung Pencampuran Cat

Tabung pencampuran berfungsi sebagai wadah untuk mencampurkan seluruh komponen warna hingga diperoleh warna yang homogen dan Motor digunakan untuk menggerakkan pengaduk sehingga menghasilkan aliran turbulen di dalam tabung pencampuran sehingga cat dapat tercampur secara merata.

Spesifikasi mixing tank sebagai wadah proses pencampuran cat ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4. Spesifikasi *mixing tank*

Nama	Spesifikasi
Kapasitas tabung	2 kg cat
Material tabung	stainless steel

Spesifikasi motor pengaduk yang digunakan untuk proses homogenisasi campuran cat ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3. 5. Spesifikasi Motor Pengaduk

Nama	Spesifikasi
Tipe motor	Motor DC 555 12V
Tegangan kerja	12 V DC
Kecepatan putar	430 RPM
Torsi	5 N.m
Driver motor	BTS7960 motor driver

3.3.3. Sistem Pengukuran Massa

Untuk memastikan jumlah cairan yang dikeluarkan sesuai dengan target komposisi, sistem menggunakan pengukuran massa berbasis sensor *load cell* dan *load cell* digunakan untuk mengukur massa cat secara real time sehingga sistem dapat menghentikan pompa secara otomatis ketika massa target tercapai.

Spesifikasi sensor-sensor utama yang digunakan dalam sistem secara keseluruhan dirangkum pada Tabel 3.6.

Tabel 3. 6. Spesifikasi sensor utama

Nama	Spesifikasi
Sensor	<i>load cell</i> 10 kg
Metode pengukuran	strain gauge
Modul pembaca	HX711 24-bit ADC

3.3.4. Sistem Kontrol

Sistem kontrol berfungsi mengatur seluruh proses pencampuran, mulai dari pengeluaran warna hingga pengadukan dan Sistem kontrol mengimplementasikan metode *Sequential Control*, PWM control, dan *Gravimetric Dosing* untuk menghasilkan proses pencampuran yang presisi dan konsisten.

Spesifikasi komponen pengendali yang digunakan pada sistem ditunjukkan pada Tabel 3.7.

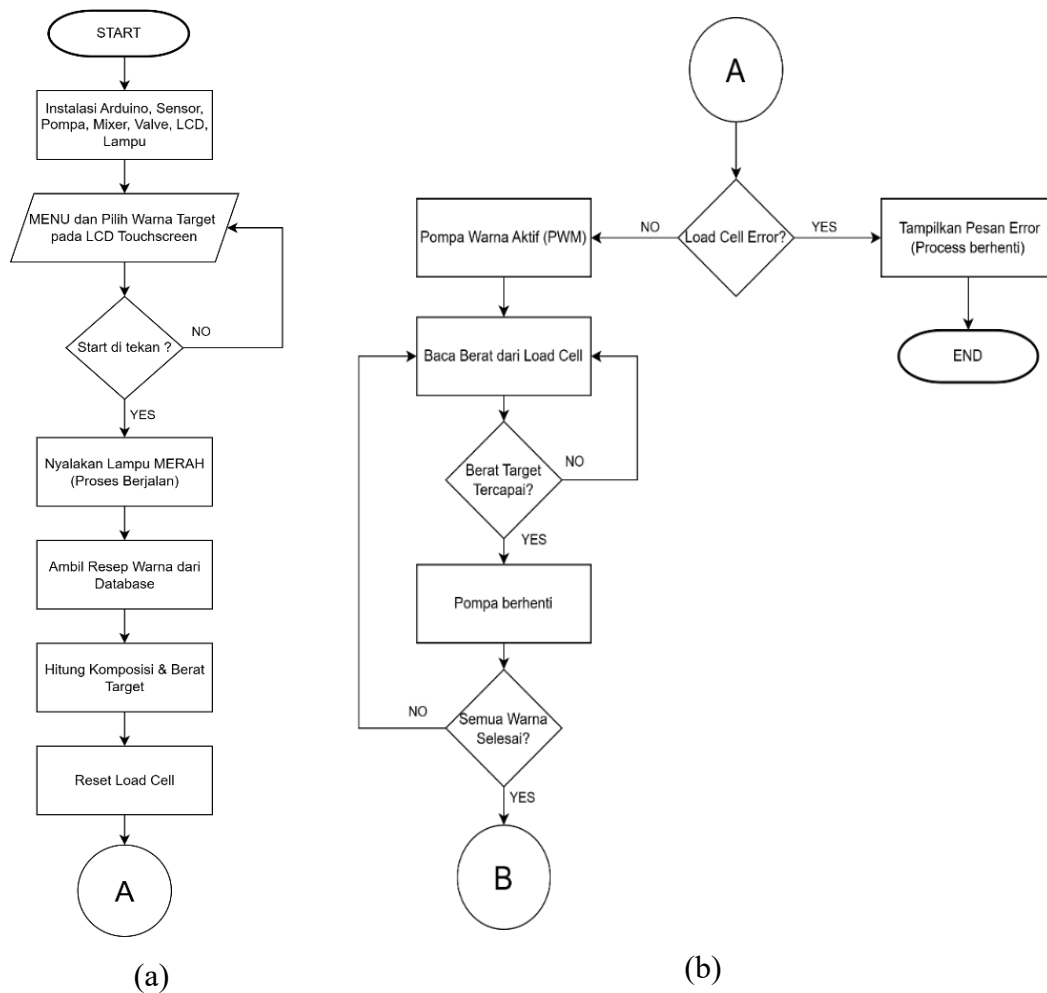
Tabel 3. 7. Spesifikasi Kontrol

Nama	Spesifikasi
Mikrokontroler	arduino mega pro mini
Pengendali pompa	MOSFET IRLZ44N
Unit pemrosesan citra	raspberry Pi 4B
Sensor visual	raspberry Pi Camera
Driver motor mixer	BTS7960

3.4. Teknik Fabrikasi

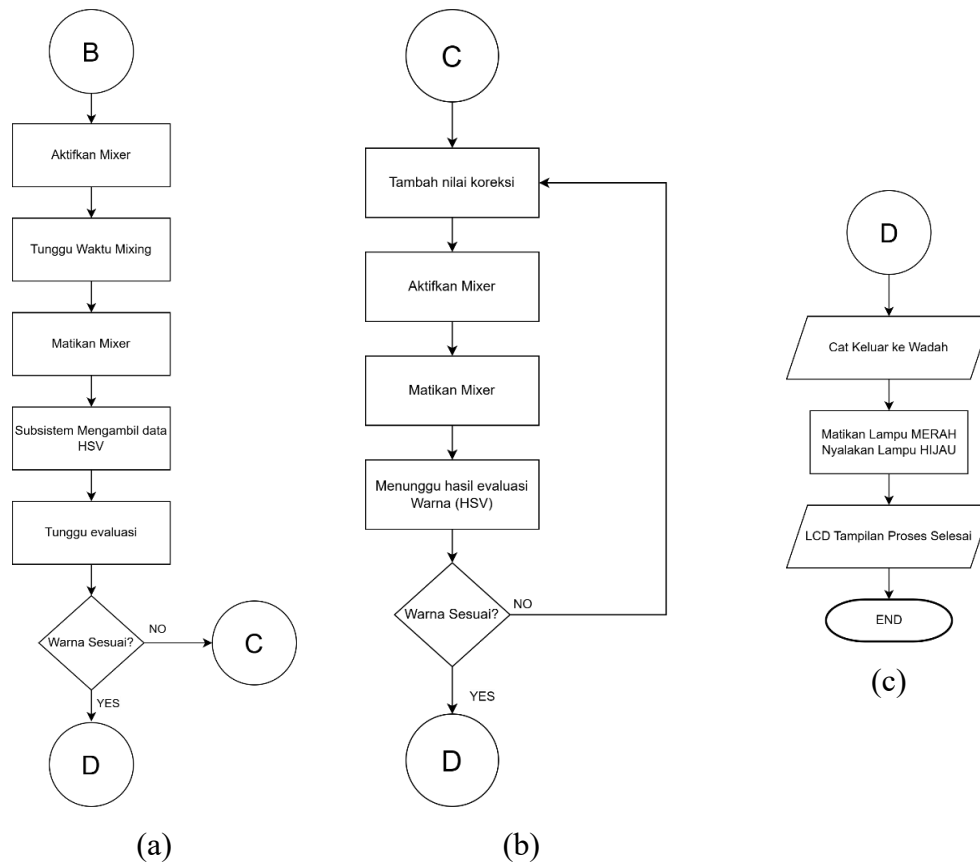
3.4.1. *Flowchart* Sistem

Flowchart sistem digunakan untuk menggambarkan alur kerja keseluruhan proses pada sistem pencampuran cat otomatis yang dirancang. Dengan menggunakan *Flowchart*, hubungan antar proses serta urutan kerja sistem dapat dijelaskan secara lebih jelas dan sistematis sehingga memudahkan dalam memahami logika kerja perangkat lunak yang digunakan pada system. Tahapan persiapan sistem dan proses dosing berbasis massa ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3. 13. (a) Persiapan Sistem (b) Dosing Berbasis Massa
(Dokumentasi Peneliti)

Selanjutnya terdapat tahapan proses mixing hingga output akhir ditunjukkan pada Gambar 3.14. sebagai berikut :



Gambar 3. 14. (a) *mixing* dan Evaluasi awal (b) Koreksi Warna (c) *Output* Akhir
(Dokumentasi Peneliti)

Tahapan realisasi *Flowchart* :

Berdasarkan Gambar 3.14, proses sistem meliputi *mixing*, evaluasi warna, dan koreksi apabila diperlukan. Tahapan realisasi sistem dilakukan berdasarkan *Flowchart* kerja alat yang telah dirancang. *Flowchart* tersebut digunakan sebagai acuan dalam membangun sistem pencampuran cat otomatis mulai dari persiapan komponen, pemilihan warna, penakaran cat, proses *mixing*, evaluasi warna, koreksi warna, hingga output akhir. Setiap blok pada *Flowchart* direalisasikan menjadi bagian kerja pada perangkat keras dan perangkat lunak agar sistem dapat berjalan sesuai urutan.

Tahap pertama adalah instalasi komponen utama pada alat. Pada tahap ini dilakukan pemasangan arduino mega pro mini sebagai pengendali utama, *load cell* dan modul HX711 sebagai sensor pembaca massa, pompa peristaltik sebagai penyalur cat, motor

mixer sebagai pengaduk, LCD *Touchscreen* sebagai antarmuka pengguna, lampu indikator sebagai penanda kondisi sistem, serta solenoid valve sebagai saluran keluaran cat. Setelah seluruh komponen terpasang, dilakukan pengecekan jalur kelistrikan untuk memastikan setiap komponen mendapatkan tegangan sesuai kebutuhan kerjanya.

Tahap berikutnya adalah perancangan dan pemasangan sistem sensor berat. *load cell* dipasang pada bagian bawah *mixing tank* agar dapat membaca massa cat yang masuk ke wadah pencampuran. *load cell* dihubungkan ke modul HX711 karena sinyal keluaran *load cell* sangat kecil dan tidak dapat dibaca langsung oleh arduino. HX711 berfungsi sebagai penguat sinyal sekaligus konverter analog ke digital, kemudian data hasil pembacaan dikirimkan ke arduino untuk diolah menjadi nilai massa dalam satuan gram.

Setelah sistem sensor berat terpasang, dilakukan kalibrasi *load cell*. Kalibrasi dilakukan untuk menentukan nilai faktor kalibrasi dan offset awal agar hasil pembacaan massa mendekati berat sebenarnya. Pada proses ini, *load cell* terlebih dahulu dibaca dalam kondisi tanpa beban untuk mendapatkan nilai offset. Setelah itu, beban referensi diletakkan di atas wadah untuk mendapatkan nilai faktor kalibrasi. Nilai hasil kalibrasi kemudian dimasukkan ke dalam program arduino agar pembacaan massa dapat digunakan pada proses dosing.

Tahap reset *load cell* pada *Flowchart* direalisasikan sebagai proses tare sebelum penakaran dimulai. Proses ini berbeda dengan kalibrasi. Kalibrasi dilakukan untuk menentukan faktor pembacaan sensor, sedangkan tare dilakukan setiap awal proses untuk menetralkan massa awal wadah atau kondisi kosong pada *mixing tank*. Dengan adanya tare, sistem hanya membaca massa cat yang masuk selama proses pencampuran berlangsung.

Tahap pemilihan warna direalisasikan melalui tampilan LCD *Touchscreen* yang sebelumnya sudah dilakukan proses kalibrasi dalam menentukan posisi *Touchscreen* agar sesuai. LCD menampilkan menu warna target yang dapat dipilih oleh pengguna. Setelah pengguna memilih warna, sistem menunggu tombol start ditekan. Jika tombol start belum ditekan, sistem tetap berada pada menu pemilihan warna. Jika tombol start

ditekan, sistem melanjutkan proses dan lampu indikator merah menyala sebagai tanda bahwa alat sedang bekerja.

Setelah sistem berjalan, arduino mengambil resep warna dari database komposisi yang telah diprogram. Database ini berisi komposisi cat dasar dalam satuan gram atau persen untuk setiap warna target. Komposisi tersebut kemudian dihitung menjadi berat target masing-masing warna. Berat target ini digunakan sebagai acuan untuk mengaktifkan pompa dan menghentikan pompa saat massa cat sudah tercapai.

Berdasarkan Gambar 3.15, flowchart menggambarkan urutan kerja metode Sequential Control. Tahap selanjutnya adalah pemeriksaan kondisi *load cell*. Pada *Flowchart* terdapat keputusan “*load cell Error?*” yang digunakan untuk memastikan sensor berat dapat bekerja sebelum proses dosing dimulai. Jika *load cell* tidak terbaca atau terjadi error, sistem akan menampilkan pesan error dan proses dihentikan. Tahap ini diperlukan agar pompa tidak bekerja ketika sensor massa mengalami gangguan, karena sistem penakaran bergantung pada data berat dari *load cell*.

Jika *load cell* tidak mengalami error, sistem masuk ke proses dosing. Proses dosing direalisasikan dengan mengaktifkan pompa peristaltik sesuai warna yang dibutuhkan. Pompa bekerja secara berurutan berdasarkan metode *Sequential Control*. Artinya, setiap pompa aktif satu per satu sesuai urutan warna dalam database, sehingga tidak ada dua warna yang keluar secara bersamaan. Dengan cara ini, massa setiap warna dapat dikontrol lebih jelas melalui pembacaan *load cell*.

Pengaturan kerja pompa dilakukan menggunakan PWM. Pada sistem ini, PWM digunakan untuk mengatur kecepatan kerja pompa. PWM tinggi digunakan ketika massa target masih jauh, sedangkan PWM lebih rendah digunakan saat massa sudah mendekati target agar pengeluaran cat lebih presisi. Prinsip ini mendukung metode *Two-stage Dosing*, yaitu tahap cepat dan tahap presisi. Tahap cepat bertujuan mempercepat pengisian, sedangkan tahap presisi bertujuan mengurangi risiko massa melewati target.

Selama pompa aktif, arduino terus membaca data massa dari *load cell* menggunakan moving average. Data massa tersebut dibandingkan dengan berat target yang telah ditentukan. Jika berat target belum tercapai, pompa tetap aktif dan sistem terus

membaca perubahan massa. Jika berat target sudah tercapai, pompa akan berhenti. Tahap ini menunjukkan penerapan metode *Gravimetric Dosing* karena penghentian pompa dilakukan berdasarkan massa aktual, bukan hanya berdasarkan waktu kerja pompa.

Setelah satu warna selesai ditakar, sistem memeriksa apakah semua warna dalam resep sudah selesai dikeluarkan. Jika masih ada warna yang belum selesai, sistem kembali mengaktifkan pompa warna berikutnya sesuai urutan. Proses ini terus berulang sampai semua warna dasar pada resep selesai dimasukkan ke *mixing tank*. Jika semua warna sudah selesai, sistem melanjutkan ke tahap mixing.

Tahap mixing direalisasikan dengan mengaktifkan motor pengaduk. Motor mixer bekerja selama waktu tertentu untuk mencampurkan seluruh cat yang sudah masuk ke *mixing tank*. Proses ini bertujuan agar warna yang telah ditakar dapat tercampur merata. Setelah waktu mixing selesai, motor mixer dimatikan. Hasil mixing kemudian siap untuk dievaluasi oleh subsistem pengolahan warna.

Setelah mixing selesai, arduino mengirimkan status bahwa campuran siap dianalisis. Pada sistem ini, status tersebut dikirimkan ke raspberry Pi melalui komunikasi serial. raspberry Pi kemudian mengaktifkan kamera untuk mengambil citra warna hasil campuran. Data warna dari kamera diproses menggunakan metode HSV untuk membandingkan warna hasil pencampuran dengan warna target.

Jika hasil evaluasi menunjukkan bahwa warna sudah sesuai, sistem akan melanjutkan ke tahap output akhir. Namun, jika warna belum sesuai, raspberry Pi menghitung nilai koreksi warna yang diperlukan. Nilai koreksi tersebut dikirimkan kembali ke arduino agar sistem dapat menambahkan warna koreksi ke dalam *mixing tank*. Tahap ini direalisasikan sebagai proses koreksi warna otomatis.

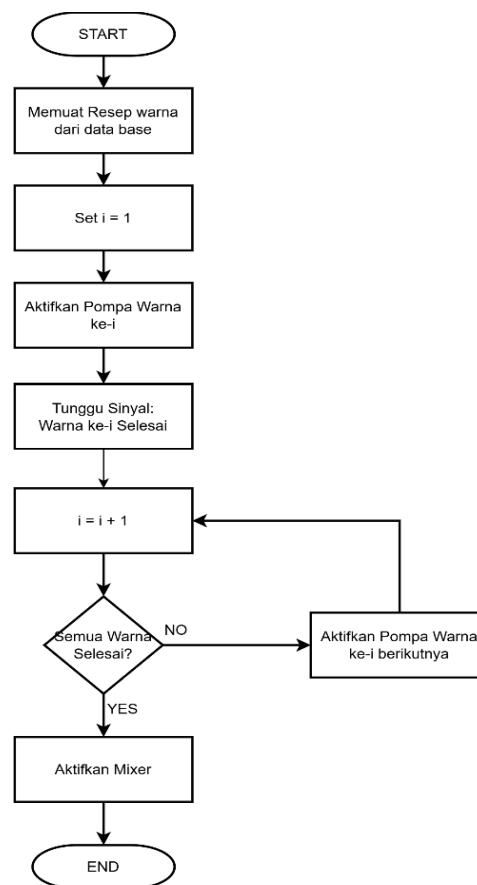
Pada proses koreksi, arduino menerima data koreksi dari raspberry Pi, kemudian mengaktifkan pompa warna yang sesuai dengan nilai koreksi tersebut. Setelah warna koreksi ditambahkan, motor mixer kembali diaktifkan agar warna tambahan tercampur merata. Setelah mixing ulang selesai, sistem kembali melakukan evaluasi warna. Proses ini dapat berulang sampai warna dinyatakan sesuai dengan target.

Tahap terakhir adalah proses output cat. Jika warna sudah sesuai, cat dikeluarkan dari *mixing tank* menuju wadah penampung melalui saluran output. Setelah proses output selesai, lampu indikator merah dimatikan dan lampu indikator hijau dinyalakan sebagai tanda bahwa proses pencampuran telah selesai. LCD juga menampilkan status bahwa proses telah selesai sehingga pengguna dapat mengambil hasil campuran cat.

3.4.2. Flowchart Metode

3.4.2.1. Metode Sequensial

Metode *sequential* merupakan metode pengendalian yang mengatur proses kerja sistem secara berurutan sesuai dengan tahapan yang telah ditentukan. Pada metode ini, setiap proses dijalankan secara bergantian, di mana proses berikutnya hanya dilakukan setelah proses sebelumnya selesai. Alur kerja sistem berbasis metode *sequential* digambarkan pada diagram alir Gambar 3.15.



Gambar 3. 15. *Flowchart sequential*

(Dokumentasi Peneliti)

Berdasarkan Gambar 3.15, flowchart menggambarkan urutan kerja metode Sequential Control. *Flowchart* diatas menggambarkan mekanisme pengeluaran warna secara berurutan berdasarkan resep yang telah ditentukan. Sistem bekerja menggunakan indeks urutan untuk memastikan setiap warna diproses satu per satu hingga seluruh komposisi selesai.

Proses dimulai dari START. Sistem memuat resep warna dari database yang berisi daftar warna dan komposisinya. Setelah resep masukkan, sistem menginisialisasi variabel indeks dengan nilai awal $i = 1$, yang menunjukkan warna pertama dalam urutan resep. Selanjutnya, pompa untuk warna ke- i diaktifkan. Sistem menunggu hingga proses pengisian warna tersebut selesai, yang ditandai dengan sinyal bahwa berat target untuk warna ke- i telah tercapai.

Setelah warna ke- i selesai, indeks diperbarui menjadi:

$$i = i + 1$$

Artinya sistem berpindah ke warna berikutnya dalam daftar resep.

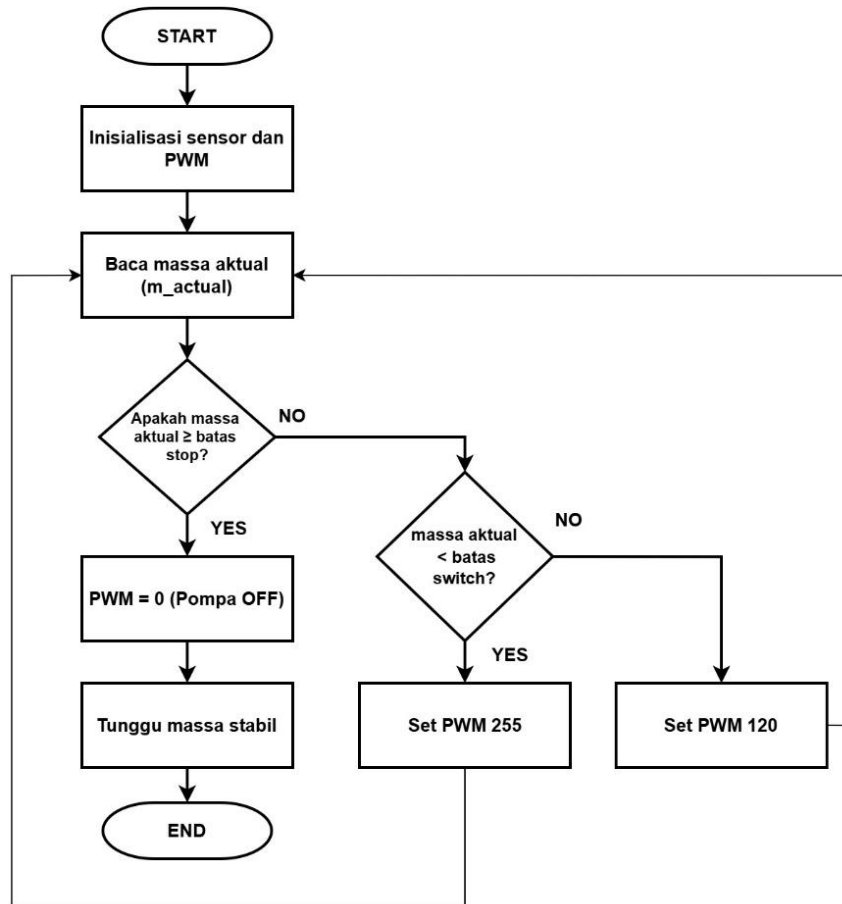
Kemudian dilakukan pengecekan apakah seluruh warna telah selesai diproses. Jika belum, sistem kembali mengaktifkan pompa warna berikutnya sesuai nilai indeks terbaru dan proses berulang. Jika seluruh warna dalam resep telah selesai ditambahkan, sistem melanjutkan ke tahap berikutnya, yaitu mengaktifkan mixer untuk proses homogenisasi, kemudian proses berakhir (END).

3.4.2.2. Flowchart PWM

Pada sistem pengendalian pompa dalam penelitian ini, *metode Pulse Width Modulation* (PWM) digunakan untuk mengatur besar kecilnya kecepatan pompa sehingga debit cairan yang keluar dapat dikontrol secara lebih presisi. *Flowchart* PWM pada sistem ini menggambarkan proses pengaturan nilai PWM yang dimulai dari inisialisasi sistem, pemberian nilai PWM oleh mikrokontroler, hingga pengendalian kecepatan pompa sesuai dengan nilai yang telah ditentukan.

Flowchart tersebut menjelaskan proses gravimetric *Two-stage Dosing* berdasarkan pembacaan massa aktual dari *load cell*. Sistem terlebih dahulu menginisialisasi sensor, nilai PWM, target massa, batas switch, dan batas stop. Selama massa aktual masih di bawah batas switch, pompa bekerja pada PWM 255 sebagai tahap cepat

Setelah massa mencapai batas switch tetapi belum mencapai batas stop, PWM diturunkan menjadi 120 sebagai tahap presisi. Ketika massa aktual mencapai batas stop, pompa dimatikan, sistem menunggu hingga massa stabil, kemudian massa akhir dicatat. Proses tersebut bertujuan mempercepat penakaran sekaligus mengurangi kelebihan massa akibat sisa aliran setelah pompa berhenti. Alur kerja sistem berbasis metode PWM digambarkan pada diagram alir Gambar 3.16.



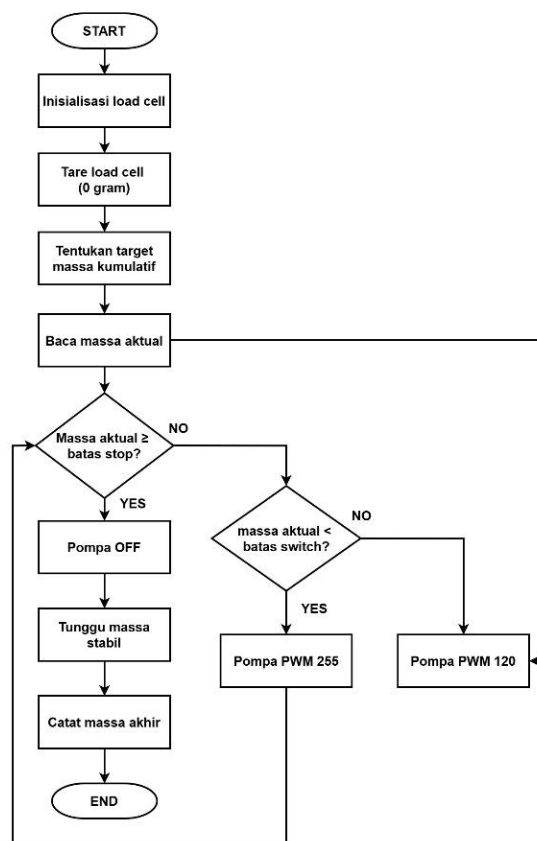
Gambar 3. 16. Flowchart PWM

(Dokumentasi Peneliti)

3.4.2.3. Flowchart Gravimetric

Metode *Gravimetric* digunakan dalam sistem ini untuk mengontrol proses pencampuran cairan berdasarkan nilai massa yang diukur secara langsung. Prinsip dasar metode *Gravimetric* adalah mengukur berat bahan yang masuk ke dalam wadah menggunakan sensor *load cell*, kemudian membandingkannya dengan nilai massa

target yang telah ditentukan sebelumnya. *Flowchart Gravimetric* menggambarkan alur kerja proses tersebut, dimulai dari pembacaan sensor berat, perbandingan dengan massa target, hingga pengendalian pompa berdasarkan hasil pengukuran. Diagram alur ini menunjukkan bagaimana sistem memastikan proses penambahan cairan berlangsung secara otomatis dan presisi berdasarkan data massa yang diperoleh dari sensor. Alur kerja sistem dosing berbasis metode gravimetric digambarkan pada diagram alir Gambar 3.17.



Gambar 3. 17. *Flowchart Gravimetric*
(Dokumentasi Peneliti)

Berdasarkan Gambar 3.17, flowchart menjelaskan proses Gravimetric Dosing berbasis pembacaan massa. Flowchart tersebut menjelaskan proses gravimetric *Two-stage Dosing* yang menggunakan pembacaan *load cell* sebagai umpan balik untuk mengatur kerja pompa. Proses dimulai dengan inisialisasi *load cell*, kemudian

dilakukan tare saat wadah masih kosong agar pembacaan awal berada pada 0 g. Setelah itu, sistem menentukan target massa kumulatif sesuai komponen cat yang akan ditambahkan.

Modul HX711 pada sistem dioperasikan pada laju keluaran 10 sample per second (SPS), sehingga satu data pembacaan tersedia setiap sekitar 100 ms. Untuk mengurangi pengaruh noise dan fluktuasi pembacaan sesaat, sistem menggunakan perataan dari delapan sampel valid sebelum menentukan kondisi kestabilan massa. Selain menghitung nilai rata-rata, sistem juga membandingkan nilai maksimum dan minimum dari delapan sampel tersebut. Pembacaan dinyatakan stabil apabila rentang hasil pembacaan masih berada dalam batas yang ditentukan. Pada proses tare, nilai offset *load cell* dihitung menggunakan rata-rata sepuluh pembacaan RAW HX711

Selama proses penakaran, sistem membaca massa aktual secara terus-menerus. Jika massa aktual telah mencapai atau melebihi batas stop, pompa dimatikan. Sistem kemudian menunggu hingga pembacaan massa stabil untuk mengakomodasi sisa cat yang masih keluar dari selang, lalu mencatat massa akhir dan mengakhiri proses penakaran.

Apabila massa aktual belum mencapai batas stop, sistem memeriksa batas switch. Ketika massa aktual masih berada di bawah batas switch, pompa bekerja pada PWM 255 sebagai tahap cepat. Setelah massa mencapai batas switch tetapi belum mencapai batas stop, kecepatan pompa diturunkan menjadi PWM 120 sebagai tahap presisi. Setelah PWM ditetapkan, sistem kembali membaca massa aktual hingga kondisi penghentian terpenuhi.

Dengan alur tersebut, PWM 255 digunakan untuk mempercepat proses ketika massa masih jauh dari target, sedangkan PWM 120 digunakan untuk mengurangi laju penambahan massa ketika mendekati target. Penghentian pompa sebelum target bertujuan mengurangi *overshoot* akibat sisa aliran setelah pompa dimatikan.

Pada implementasi sistem pencampuran cat otomatis, proses tare *load cell* dilakukan satu kali pada awal sistem ketika *mixing tank* masih kosong. Setelah proses dosing berjalan, sistem tidak melakukan tare ulang pada setiap pergantian pompa. Setiap tahap dosing menggunakan pembacaan berat aktual terakhir sebagai titik awal

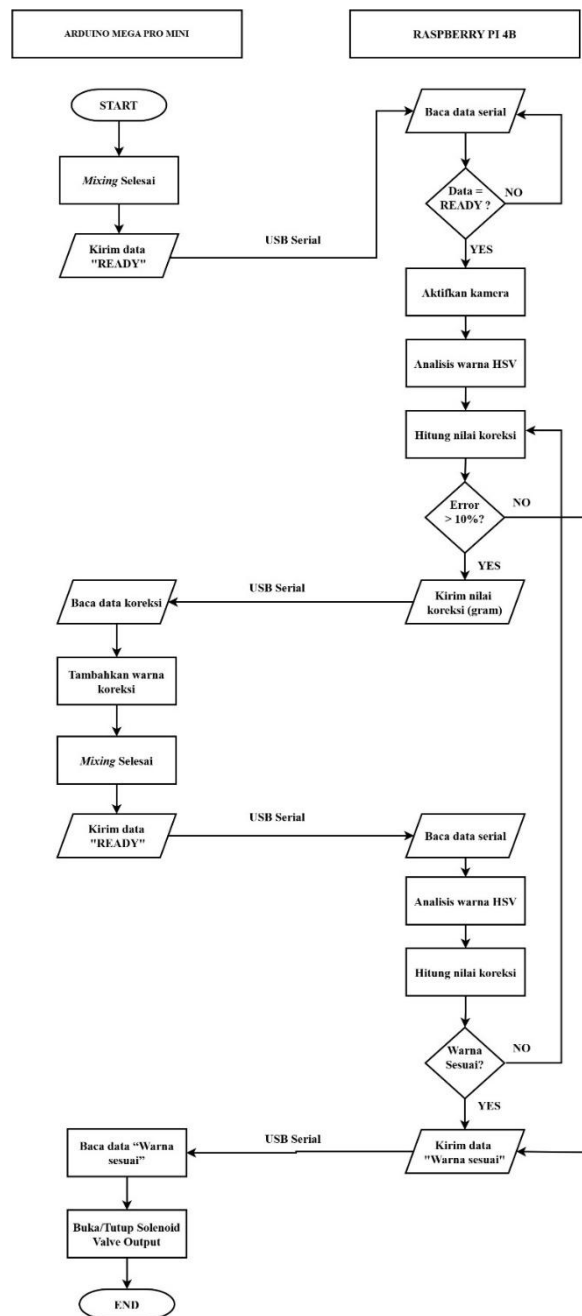
tahap berikutnya. Target tahap dihitung dari penjumlahan antara berat aktual terakhir dan target massa komponen warna yang sedang diproses. Dengan cara ini, setiap warna tetap ditakar sesuai komposisi resep meskipun tahap sebelumnya mengalami sedikit *overshoot*.

3.4.3. Flowchart Komunikasi Sistem

Flowchart komunikasi sistem menggambarkan urutan proses pertukaran data tersebut mulai dari inisialisasi komunikasi, proses pengiriman dan penerimaan data, hingga pengolahan informasi oleh mikrokontroler.

Pada sistem ini, komunikasi antara arduino Controller dan raspberry Pi dilakukan menggunakan komunikasi serial melalui kabel USB. Secara teknis, komunikasi tersebut menggunakan protokol UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) yang dapat melakukan pertukaran data secara serial antara dua perangkat.

UART adalah metode komunikasi serial asinkron yang mengirimkan data satu per satu dalam bentuk bit melalui jalur komunikasi. Pada sistem ini, komunikasi UART dijumpa oleh koneksi USB sehingga raspberry Pi dapat membaca data yang dikirim oleh arduino melalui port serial.



Gambar 3. 18. *Flowchart Komunikasi*
(Dokumentasi Peneliti)

Berdasarkan Gambar 3.18, flowchart menunjukkan alur komunikasi antara Arduino dan Raspberry Pi. Komunikasi antara arduino mega pro mini 2560 dan raspberry Pi 4B dilakukan melalui USB serial. arduino berfungsi sebagai pengendali proses

pencampuran dan penambahan cat, sedangkan raspberry Pi digunakan untuk mengambil citra serta menganalisis warna menggunakan metode HSV.

Setelah proses mixing selesai, arduino mengirimkan pesan “*READY*” kepada raspberry Pi. raspberry Pi membaca data serial secara terus-menerus dan baru mengaktifkan kamera setelah pesan tersebut diterima. Citra hasil campuran kemudian dianalisis untuk menghitung nilai error terhadap warna target.

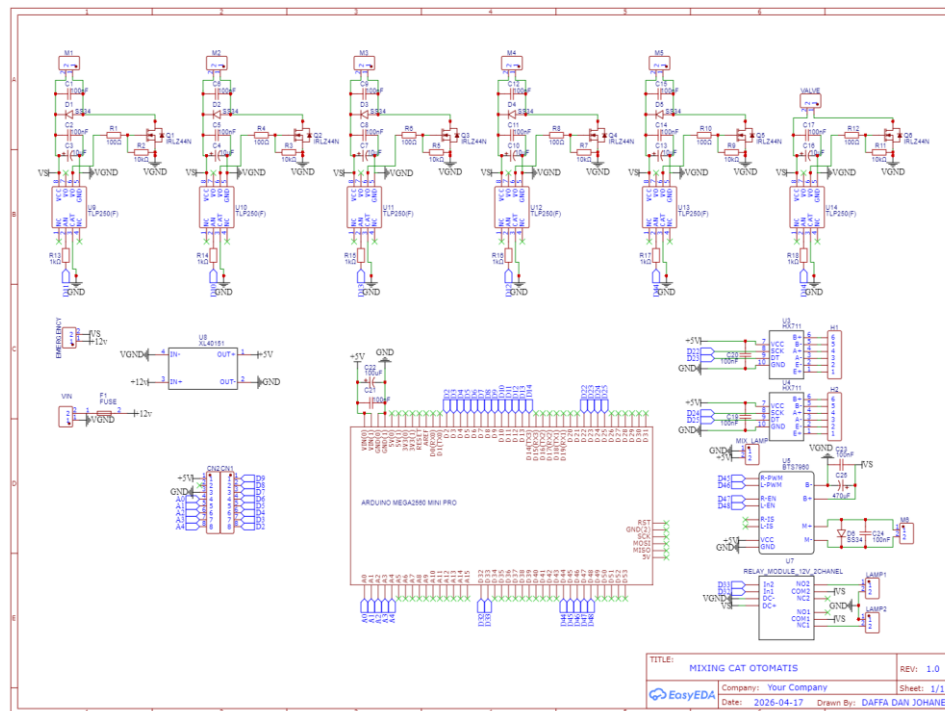
Apabila nilai error lebih dari 10%, raspberry Pi menghitung kebutuhan koreksi dan mengirimkan data warna serta massa koreksi dalam satuan gram kepada arduino. arduino kemudian menjalankan penambahan cat koreksi dan melakukan mixing ulang. Setelah proses tersebut selesai, arduino kembali mengirimkan pesan “*READY*” agar raspberry Pi melakukan analisis ulang. Proses koreksi dapat berulang sampai nilai error memenuhi batas yang ditetapkan.

Jika nilai error tidak lebih dari 10%, raspberry Pi mengirimkan status “*WARNA SESUAI*” kepada arduino. Setelah status diterima, arduino melanjutkan proses keluaran dengan mengendalikan solenoid valve output. Dengan demikian, komunikasi USB serial berfungsi untuk menyinkronkan proses mixing, analisis warna, pengiriman nilai koreksi, dan penentuan kondisi akhir sistem. Alur komunikasi data antar perangkat pada sistem digambarkan pada diagram alir Gambar 3.18.

3.4.4. Perancangan Elektrikal

3.4.4.1. Skematik Sistem elektrikal

Pada sub bab ini Perancangan skematik elektrikal bertujuan untuk menggambarkan hubungan antar komponen dalam sistem pencampuran cat otomatis. Skematik ini menunjukkan koneksi antara mikrokontroler, sensor, aktuator, serta modul pendukung lainnya sehingga sistem dapat bekerja secara terintegrasi. Rangkaian skematik elektrikal keseluruhan sistem ditunjukkan pada Gambar 3.19.



Gambar 3. 19. Skematik rangkaian elektrikal

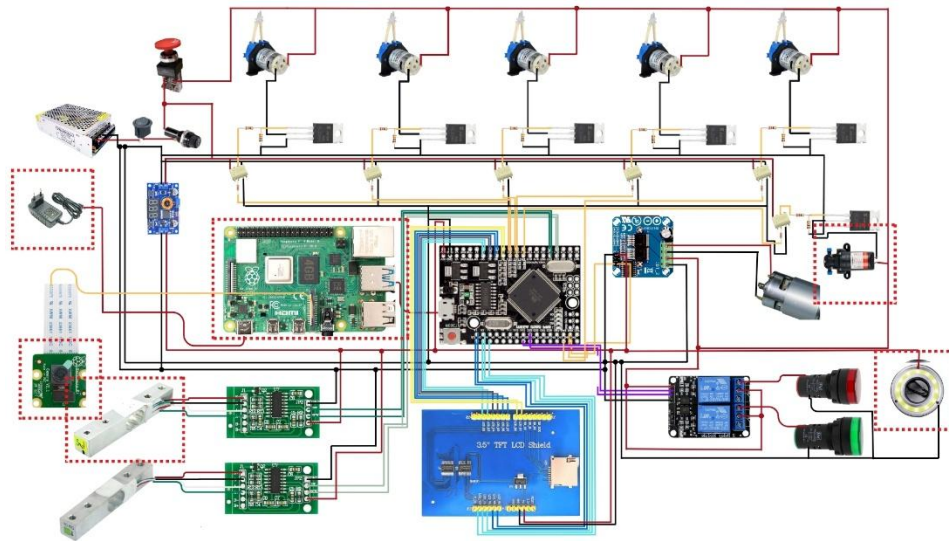
Pada gambar 3.19 Pusat kendali sistem menggunakan arduino Mega 2560 Pro Mini yang berfungsi untuk mengolah data sensor dan mengatur seluruh aktuator. Pada bagian aktuator, terdapat beberapa pompa *peristaltic* yang masing-masing dikendalikan melalui rangkaian driver yang terdiri dari *optocoupler* TLP250 dan MOSFET sebagai saklar elektronik. Rangkaian ini dapat mengatur aliran cairan secara presisi menggunakan sinyal PWM dari mikrokontroler. Selain itu, setiap pompa dilengkapi dengan dioda *flyback* dan kapasitor untuk meredam lonjakan tegangan serta menjaga kestabilan sistem.

Pada bagian pengukuran, digunakan sensor *load cell* yang dihubungkan dengan modul HX711 untuk membaca massa cairan. Data ini digunakan sebagai umpan balik dalam metode *Gravimetric Dosing* sehingga sistem dapat menghentikan pengisian secara otomatis ketika massa target tercapai. Untuk proses pencampuran, digunakan motor DC yang dikendalikan oleh driver BTS7960, yang memungkinkan pengaturan arah dan kecepatan putaran motor dengan arus yang lebih besar. Selain itu, terdapat modul relay yang digunakan untuk mengontrol lampu indikator sebagai penanda status sistem. Dari sisi catu daya, sistem menggunakan sumber tegangan 12V yang kemudian

diturunkan menjadi 5V menggunakan modul step-down untuk memenuhi kebutuhan tegangan komponen logika seperti mikrokontroler dan sensor.

3.4.4.2. Diagram sistem elektrikal

Subbab ini menjelaskan perancangan wiring komponen elektrikal yang digunakan dalam sistem. Wiring elektrikal merupakan proses penghubungan antar komponen elektronik agar seluruh bagian sistem dapat saling terintegrasi dan bekerja sesuai dengan fungsinya. Pada tahap ini dilakukan pengaturan jalur koneksi antara mikrokontroler, sensor, aktuator, serta sumber daya listrik yang digunakan dalam sistem. Realisasi sistem kelistrikan yang telah dibuat ditunjukkan pada Gambar 3.20.



Gambar 3. 20. Elektrikal system
(Dokumentasi Peneliti)

Berdasarkan Gambar 3.20, realisasi rangkaian elektrikal telah disusun sesuai skematik. Sistem dirancang dengan arsitektur kontrol menggunakan mikrokontroler arduino Mega pro mini sebagai unit pemrosesan utama. Seluruh komponen dibagi menjadi empat blok utama, yaitu sumber daya, input (sensor), proses kontrol, dan output (aktuator). Pembagian ini bertujuan untuk menjaga kestabilan sistem, meminimalkan gangguan listrik, serta memastikan akurasi pengukuran berbasis massa.

Sumber daya berasal dari power supply 12V 10A DC yang kemudian diturunkan menjadi tegangan kerja 5V 5A menggunakan modul buck converter. Tegangan ini digunakan untuk mensuplai rangkaian logika seperti mikrokontroler, modul sensor,

LCD, dan relay. Jalur ground seluruh sistem dibuat menjadi satu bersama (common ground) agar tidak terjadi perbedaan potensial yang dapat menyebabkan kesalahan pembacaan sensor atau gangguan sinyal kontrol. Beban motor dipisahkan jalur dayanya dari rangkaian logika untuk mengurangi noise akibat switching arus tinggi.

Bagian input terdiri dari dua *load cell* yang masing-masing terhubung ke modul penguat dan konverter analog-ke-digital (HX711). *load cell* berfungsi mengubah gaya berat menjadi perubahan resistansi, yang kemudian diperkuat dan dikonversi menjadi data digital oleh modul tersebut. Data massa inilah yang menjadi dasar sistem *Gravimetric Dosing*. Karena sistem berbasis massa, kestabilan suplai dan kualitas grounding sangat berpengaruh terhadap akurasi pembacaan.

Unit proses berada pada mikrokontroler yang menerima data dari sensor, melakukan perhitungan massa target, kemudian mengatur aktuator berdasarkan algoritma kontrol. Pengendalian kecepatan pompa dilakukan menggunakan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*), yaitu metode pengaturan daya dengan memodulasi lebar pulsa sehingga debit cairan dapat dikontrol secara presisi.

Bagian output terdiri dari lima pompa peristaltik, modul driver motor untuk pompa mixing, serta relay indikator. Pompa-pompa dosing dikendalikan melalui MOSFET sebagai saklar elektronik. MOSFET memungkinkan mikrokontroler mengendalikan beban arus tinggi tanpa kontak mekanis, sehingga lebih efisien dan tahan lama dibandingkan saklar konvensional. Pompa mixing dikendalikan melalui driver motor khusus untuk memungkinkan pengaturan arah dan kecepatan secara stabil. Sistem juga dilengkapi modul relay yang mengaktifkan indikator visual seperti LED merah dan hijau untuk menunjukkan status proses, misalnya kondisi pencampuran aktif, selesai, atau terjadi kesalahan. Tampilan LCD digunakan sebagai antarmuka pengguna untuk menampilkan parameter input, pembacaan massa *realtime*, dan status sistem.

Keterangan arus kerja pada tiap komponen elektronik yang digunakan dirangkum pada Tabel 3.8.

Tabel 3. 8. Keterangan arus

Komponen	Jumlah	Arus per komponen	Total arus
Peristaltic Pump NKP-DC-S10B	5	0.25 A	1.25 A
Motor DC 555 <i>HIGH</i> Torque	1	0.83A	0.83A
Solenoid Valve 1/4	1	1A	1A
Relay Module 2 Channel	1	0.14 A	0.14 A
LED COB Lamp	1	0.8 A	0.8 A
Pilot Lamp 22 mm	1	0.02 A	0.02 A
Motor Driver BTS7960 Motor	1	0.01 A	0.01 A
Driver Module Buck Converter			
XL4015 DC-DC Buck Converter	1	0.05 A	0.05 A
Module (input) arduino	1	0.02 A	0.02 A
HX711 <i>load cell</i> Amplifier	2	0.002 A	0.004 A

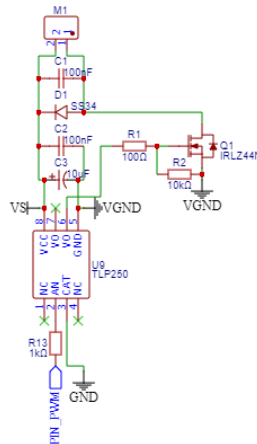
Berdasarkan Tabel 3.8, kebutuhan arus masing-masing komponen telah dihitung. Berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan arus pada setiap komponen, total arus yang dibutuhkan oleh sistem adalah sekitar 4,124 A atau dapat dibulatkan menjadi 4,2 A. Nilai tersebut diperoleh dari penjumlahan arus seluruh beban, yaitu lima pompa

peristaltik, motor DC, solenoid valve, relay, lampu LED COB, pilot lamp, driver motor BTS7960, buck converter, arduino, dan modul HX711.

Namun, dalam perancangan sistem kelistrikan, kapasitas power supply tidak disarankan dibuat sama persis dengan total arus beban. Hal ini karena komponen seperti motor DC, pompa, dan solenoid valve dapat membutuhkan arus awal yang lebih besar ketika pertama kali aktif. Oleh karena itu, diperlukan cadangan arus agar sistem tetap stabil dan tidak mengalami penurunan tegangan saat beberapa komponen bekerja secara bersamaan. Dengan mempertimbangkan faktor keamanan, total arus sebesar 4,124 A dikalikan dengan faktor cadangan sekitar 1,5, sehingga kebutuhan arus minimum menjadi sekitar 6,186 A. Berdasarkan perhitungan tersebut, power supply yang di gunakan pada sistem ini yaitu 12 V 10A.

3.4.4.3. Rangkaian *Driver* MOSFET

Rangkaian driver MOSFET digunakan sebagai pengendali beban DC, seperti motor atau pompa peristaltik, yang membutuhkan arus lebih besar daripada kemampuan keluaran langsung mikrokontroler. Pada sistem ini, sinyal PWM dari arduino tidak langsung diberikan ke beban, tetapi diproses terlebih dahulu oleh TLP250 sebagai gate driver. Penggunaan gate driver bertujuan agar MOSFET dapat bekerja lebih stabil saat proses switching, terutama ketika beban dikendalikan menggunakan PWM. TLP250 sendiri memang dirancang untuk rangkaian penggerak gate IGBT maupun power MOSFET, dengan tegangan suplai kerja 10–35 V [57]. Rangkaian driver yang digunakan untuk mengendalikan MOSFET ditunjukkan pada Gambar 3.21.



Gambar 3. 21. Rangkaian Driver MOSFET

Berdasarkan Gambar 3.21, driver MOSFET digunakan untuk mengendalikan pompa peristaltik. Pemilihan MOSFET pada rangkaian ini lebih sesuai dibandingkan BJT, relay, IGBT, maupun driver L298N karena sistem bekerja pada beban DC 12 V berupa motor atau pompa peristaltik yang membutuhkan pengaturan kecepatan melalui sinyal PWM. MOSFET dapat bekerja sebagai saklar elektronik yang dikendalikan melalui tegangan pada gate, sehingga cocok untuk proses switching cepat dan berulang. Pada tugas akhir ini bahwa, pengendalian kecepatan motor DC dilakukan menggunakan metode *pulse width modulation* dengan N-channel MOSFET, di mana sinyal PWM dari mikrokontroler digunakan sebagai masukan rangkaian pengendali motor DC [58].

BJT dapat digunakan sebagai saklar elektronik maupun penguat sinyal, terutama pada rangkaian beban kecil atau aplikasi switching sederhana. Akan tetapi, BJT bekerja dengan memanfaatkan arus kecil pada terminal basis untuk mengendalikan arus yang lebih besar pada sisi kolektor dan emitor. Pada aplikasi pompa DC yang dikendalikan PWM, kebutuhan arus kontrol pada basis dan rugi daya saat saturasi membuat BJT kurang ideal dibandingkan MOSFET [59]. Relay dapat digunakan sebagai saklar beban listrik, terutama untuk sistem ON/OFF sederhana yang tidak membutuhkan switching cepat. Namun, relay bekerja secara elektromekanik, yaitu menggunakan energi magnet untuk menggerakkan kontak saklar. Karena memiliki kontak mekanik, relay kurang sesuai untuk PWM yang membutuhkan proses ON dan OFF cepat serta berulang. Jika

relay digunakan untuk PWM, kontakannya berpotensi cepat aus, menimbulkan bunyi mekanik, dan tidak mampu mengikuti frekuensi switching dengan baik. IGBT juga termasuk komponen saklar daya yang dapat digunakan pada rangkaian konverter, inverter, maupun pengendali motor berdaya besar. Namun, IGBT lebih umum digunakan pada sistem dengan tegangan dan daya yang lebih tinggi. Untuk sistem tegangan rendah seperti pompa DC 12 V, MOSFET lebih sesuai karena memiliki switching cepat, rangkaian pengendali lebih sederhana, dan rugi daya lebih kecil pada aplikasi tegangan rendah [60]. Serta, Driver L298N juga tidak dipilih karena rangkaian ini hanya membutuhkan pengendalian pompa DC satu arah melalui PWM, bukan pembalikan arah putaran. L298N lebih sesuai untuk sistem yang membutuhkan pengaturan arah dan kecepatan motor DC karena menggunakan konfigurasi dual H-bridge. Pada beberapa penelitian, L298 memiliki total voltage drop yang dapat mencapai sekitar 4,9 V pada arus 2 A, sehingga sebagian tegangan sumber akan jatuh pada driver [61].

Dengan pertimbangan tersebut, MOSFET menjadi pilihan yang paling sesuai untuk rangkaian driver pompa DC 12 V karena mampu bekerja sebagai saklar elektronik cepat, cocok untuk PWM, lebih sederhana, dan efisien untuk pengendalian beban satu arah, sehingga kombinasi TLP250 sebagai gate driver dan MOSFET IRLZ44N sebagai saklar daya merupakan pilihan yang paling tepat.

3.4.5. Perancangan Perangkat Lunak

3.4.6.1. Pembacaan dan Kalibrasi *load cell*

3.4.6.1.1. Kalibrasi Sensor *load cell* 10 kg

Kalibrasi sensor *load cell* dilakukan untuk memperoleh hubungan antara nilai pembacaan RAW dari modul HX711 dengan massa sebenarnya sehingga sistem dapat menampilkan hasil pengukuran dalam satuan gram secara akurat. Pada pengujian ini digunakan *load cell* berkapasitas 10 kg yang dipadukan dengan modul HX711 sebagai penguat sinyal dan konverter analog ke digital. Pengujian dilakukan menggunakan variasi beban mulai dari 0 gram hingga 7000 gram dengan interval 1000 gram. Rentang pengujian tersebut dipilih karena masih berada di bawah kapasitas maksimum sensor sehingga karakteristik linearitas sensor dapat diamati dengan baik.

3.4.6.1.2. Pengambilan Data RAW Tanpa Beban

Pengambilan data RAW tanpa beban dilakukan untuk menentukan nilai offset sensor. Offset merupakan nilai awal pembacaan sensor ketika tidak terdapat massa tambahan pada area timbang. Nilai ini penting karena *load cell* tidak selalu menghasilkan pembacaan nol secara langsung pada kondisi kosong. Perbedaan nilai awal dapat dipengaruhi oleh karakteristik sensor, dudukan mekanik, tegangan catu daya, serta noise pada rangkaian pembacaan. Hasil Data RAW untuk faktor kalibrasi ditunjukkan pada Tabel 3.9.

Tabel 3. 9. Data RAW untuk faktor kalibrasi

Kondisi	Massa standar	RAW HX711	Fungsi
Tanpa beban	0 g	-376024	Offset
Beban standar	2000 g	15799	Penentuan faktor

Berdasarkan Tabel 3.9, data RAW digunakan untuk menentukan faktor kalibrasi load cell. Pada pengujian ini, nilai RAW tanpa beban yang diperoleh adalah -376024. Nilai tersebut kemudian digunakan sebagai titik nol dalam proses konversi massa. Dengan adanya offset, sistem tidak membaca nilai RAW secara langsung sebagai massa, tetapi menghitung selisih antara RAW saat diberi beban dan RAW saat kondisi kosong.

Penggunaan offset diperlukan agar hasil pembacaan setelah kalibrasi menunjukkan massa bersih atau massa netto. Pada sistem pencampuran cat, prinsip ini juga penting karena wadah kosong dapat dilakukan tare terlebih dahulu, sehingga massa yang terbaca hanya massa bahan yang masuk ke wadah.

3.4.6.1.3. Penentuan Faktor Kalibrasi

Faktor kalibrasi digunakan untuk mengubah nilai RAW HX711 menjadi satuan gram. Faktor ini diperoleh dari selisih nilai RAW pada beban standar terhadap nilai RAW tanpa beban, kemudian dibagi dengan massa beban standar yang digunakan. Pada pengujian ini, beban standar yang digunakan untuk menentukan faktor kalibrasi adalah 2000 g.

Dengan data:

$$RAW_0 = -376024$$

$$RAW_{2000g} = 15799$$

$$\text{Beban} = 2000g$$

Maka:

$$\text{Faktor Kalibrasi} = \frac{15799 - (-376024)}{2000}$$

$$\text{Faktor Kalibrasi} = \frac{391823}{2000}$$

$$\text{Faktor Kalibrasi} = 195,912$$

faktor kalibrasi yang digunakan pada sistem adalah 195,9115 Setelah faktor kalibrasi diperoleh, massa dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Berat} = \frac{RAW - (-376024)}{195,912}$$

Penentuan faktor kalibrasi dengan pendekatan linear ini digunakan karena output *load cell* terhadap beban cenderung membentuk hubungan linear pada rentang kerja yang sesuai.

3.4.6.1.4. Implementasi Konversi Data RAW Menjadi Massa

Implementasi pembacaan *load cell* menggunakan fungsi bawaan library HX711. Fungsi tare() digunakan untuk menentukan offset pada kondisi *mixing tank* kosong, sedangkan set_scale() digunakan untuk memasukkan faktor kalibrasi. Selanjutnya, fungsi get_units() menghasilkan nilai massa setelah data RAW dikurangi offset dan dibagi dengan faktor kalibrasi. Nilai RAW murni tetap dapat diamati menggunakan fungsi read() atau read_average(). Nilai offset sebesar -376024 diperoleh pada proses kalibrasi. Pada implementasi program utama, offset ditentukan kembali menggunakan fungsi tare() ketika *mixing tank* berada dalam kondisi kosong.

3.4.6.1.5. Pengolahan Data Massa Menggunakan Moving Average

Pengolahan data massa pada sistem ini dilakukan menggunakan metode moving average untuk menstabilkan hasil pembacaan *load cell*. Data yang diperoleh dari modul HX711 pada awalnya masih berupa nilai RAW, sehingga perlu dikonversi menjadi

satuan gram menggunakan nilai offset dan faktor kalibrasi. Setelah nilai berat diperoleh, data tersebut tidak langsung digunakan sebagai dasar keputusan sistem, tetapi dirata-ratakan terlebih dahulu dari beberapa pembacaan terakhir.

Metode moving average digunakan karena pembacaan *load cell* dapat mengalami perubahan kecil akibat noise, getaran mekanik, atau fluktuasi sinyal dari modul HX711. Pada sistem pencampuran cat, perubahan kecil pada pembacaan massa dapat memengaruhi keputusan hidup dan mati pompa. Oleh karena itu, nilai berat yang digunakan oleh sistem harus cukup stabil agar proses dosing tidak berhenti terlalu cepat atau terlambat.

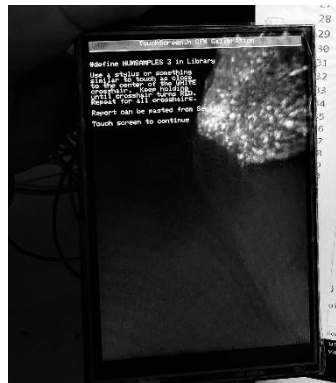
Dengan nilai kalibrasi yang digunakan adalah Offset -376024 dan Faktor Kalibrasi 195,9115, tetapi Nilai offset -376024 merupakan offset yang diperoleh saat pengujian kalibrasi. Pada pengoperasian alat, offset aktual ditentukan kembali melalui fungsi tare() ketika *mixing tank* kosong, sedangkan faktor kalibrasi tetap menggunakan nilai 195,9115.

Setelah berat terbaca diperoleh, program melakukan proses moving average dengan mengambil sejumlah data pembacaan terakhir, kemudian menghitung nilai rata-ratanya. Pada sistem ini, jumlah data yang digunakan adalah 10 data pembacaan. Nilai tersebut dipilih karena mampu mengurangi noise kecil pada pembacaan *load cell* tanpa membuat respons sistem menjadi terlalu lambat. Hasil moving average kemudian digunakan sebagai nilai massa utama dalam proses pengambilan keputusan sistem

3.4.6.2. Kalibrasi LCD TFT

3.4.6.2.1. Prosedur Kalibrasi *Touchscreen*

Kalibrasi *Touchscreen* dilakukan menggunakan program kalibrasi yang tersedia pada library MCUFRIEND_kbv dan *Touchscreen*. Program kalibrasi akan menampilkan beberapa titik referensi (*crosshair*) yang harus disentuh oleh pengguna secara berurutan. Data koordinat mentah yang diperoleh dari setiap titik referensi digunakan untuk menentukan batas pembacaan *Touchscreen* pada sumbu X dan Y. Tampilan awal program kalibrasi layar sentuh ditunjukkan pada Gambar 3.22.



Gambar 3. 22. Tampilan Awal Program Kalibrasi *Touchscreen*

Berdasarkan Gambar 3.22, proses kalibrasi touchscreen diawali dengan tampilan program kalibrasi. Tampilan awal program kalibrasi *Touchscreen* yang berisi petunjuk penggunaan sebelum proses kalibrasi dimulai. Sentuh layar untuk melanjutkan ke tahap kalibrasi.

Proses kalibrasi layar sentuh yang dilakukan ditunjukkan pada Gambar 3.23.

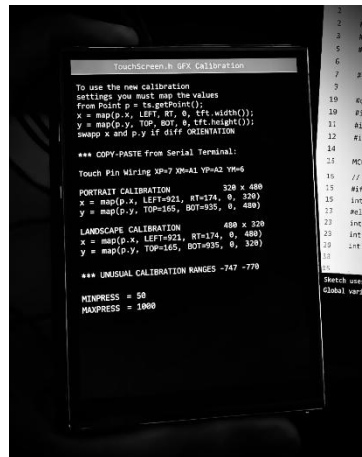


Gambar 3. 23. Proses Kalibrasi *Touchscreen*

Berdasarkan Gambar 3.23, pengguna melakukan kalibrasi dengan menyentuh titik yang ditentukan. Proses pengambilan data koordinat *Touchscreen* dengan cara menyentuh dan tahan titik referensi (*crosshair*) yang ditampilkan pada beberapa posisi layar TFT.

3.4.6.2.2. Nilai Kalibrasi *Touchscreen*

Setelah seluruh titik referensi berhasil disentuh, sistem menghasilkan parameter kalibrasi yang digunakan sebagai dasar pemetaan koordinat *Touchscreen* pada program utama. Hasil kalibrasi yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 3.24.



Gambar 3. 24. Hasil kalibrasi LCD

Berdasarkan Gambar 3.24, hasil kalibrasi digunakan sebagai parameter pembacaan *touchscreen*. Tampilan hasil kalibrasi *Touchscreen* yang menunjukkan nilai parameter koordinat yang digunakan dalam proses pemetaan sentuhan pada layar TFT.

Hasil kalibrasi touchscreen agar titik sentuh sesuai dengan koordinat tampilan disajikan pada Tabel 3.10.

Tabel 3. 10. Hasil Kalibrasi *Touchscreen*

Parameter	Nilai
TS_LEFT	921
TS_RT	174
TS_TOP	165
TS_BOT	935
MINPRESS	50
MAXPRESS	1000

3.4.6.2.3. Implementasi Hasil Kalibrasi

Nilai hasil kalibrasi selanjutnya diterapkan pada program utama menggunakan fungsi pemetaan (*mapping*). Fungsi ini digunakan untuk mengubah koordinat mentah yang dibaca *Touchscreen* menjadi koordinat layar TFT sehingga posisi sentuhan pengguna dapat dikenali secara tepat oleh sistem.

Parameter TS_LEFT dan TS_RT digunakan sebagai batas pembacaan koordinat pada sumbu horizontal, sedangkan TS_TOP dan TS_BOT digunakan sebagai batas

pembacaan koordinat pada sumbu vertikal. Nilai MINPRESS dan MAXPRESS digunakan untuk menentukan rentang tekanan sentuhan yang dianggap valid oleh sistem.

3.4.6. Penentuan Kebutuhan Torsi Motor Pengaduk

Pada sistem pencampuran cat, motor pengaduk berfungsi sebagai penggerak utama yang memutar impeller di dalam *mixing tank*. Pemilihan motor tidak hanya ditentukan berdasarkan kecepatan putar, tetapi juga harus memperhatikan kebutuhan torsi agar motor mampu mengaduk cat dengan stabil. Torsi yang terlalu kecil dapat menyebabkan motor mengalami penurunan putaran atau tidak mampu menggerakkan impeller saat beban cat meningkat. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan kebutuhan torsi motor berdasarkan karakteristik fluida, dimensi impeller, kecepatan putar, serta panjang shaft yang digunakan pada sistem pengaduk.

Penentuan kebutuhan torsi motor pengaduk dipengaruhi oleh karakteristik mekanik sistem dan sifat fisik fluida yang akan diaduk. Salah satu parameter yang memengaruhi beban pengadukan adalah viskositas dan densitas cat, karena kedua parameter tersebut berhubungan dengan hambatan fluida terhadap gerakan impeller selama proses pencampuran.

Pada penelitian ini, karakteristik cat yang digunakan mengacu pada cat tembok emulsi dengan nilai kekentalan sebesar 90 KU berdasarkan SNI 3564:2009 tentang cat tembok emulsi [62]. Selain itu, berdasarkan penelitian Cahyadi dan Puspita mengenai karakteristik cat tembok emulsi, diperoleh nilai densitas cat sebesar 1,48 g/mL atau 1480 kg/m³ [63]. Nilai tersebut digunakan sebagai parameter fluida dalam memperkirakan beban pengadukan pada mixing tank.

Massa cat:

$$m = 2 \text{ kg}$$

Viskositas cat:

$$\mu = 90 \text{ KU}$$

Konversi viskositas:

$$90 \text{ KU} \approx 10.000 \text{ cP}$$

$$1 \text{ cP} = 0,001 \text{ Pa.s}$$

$$\mu = 10.000 \times 0,001$$

$$\mu = 10 \text{ Pa.s}$$

Densitas cat:

$$\rho = 1480 \text{ kg/m}^3$$

Diameter impeller:

$$D = 9 \text{ cm} = 0,09 \text{ m}$$

Diameter wadah:

$$Dt = 13 \text{ cm} = 0,13 \text{ m}$$

Panjang shaft:

$$L = 32 \text{ cm} = 0,32 \text{ m}$$

Kecepatan putar motor:

$$N = 430 \text{ RPM}$$

Faktor keamanan:

$$SF = 3$$

Faktor shaft:

$$K_s = 1,3$$

1. Konversi Kecepatan Putar

$$n = \frac{N}{60}$$

$$n = \frac{430}{60}$$

$$n = 7,167 \text{ s}^{-1}$$

2. Perhitungan Bilangan Reynolds

$$Re = \frac{\rho \times n \times D^2}{\mu}$$

$$Re = \frac{1480 \times 7,167 \times (0,09)^2}{10}$$

$$Re = \frac{1480 \times 7,167 \times 0,0081}{10}$$

$$Re = \frac{85,92}{10}$$

$$Re = 8,60$$

Karena nilai Re lebih kecil dari 10, maka proses pengadukan dikategorikan berada pada kondisi aliran laminar. Kondisi ini sesuai dengan karakter cat yang memiliki viskositas tinggi, sehingga hambatan fluida terhadap impeller relatif besar.

3. Perhitungan Power Number

$$N_p = \frac{70}{Re}$$

$$N_p = \frac{70}{8,60}$$

$$N_p = 8,14$$

4. Perhitungan Daya Pengadukan

$$P = N_p \times \rho \times n^3 \times D^5$$

$$n^3 = (7,167)^3 = 368,09$$

$$D^5 = (0,09)^5 = 0,0000059049$$

$$P = 8,14 \times 1480 \times 368,09 \times 0,0000059049$$

$$P = 26,20W$$

Dengan demikian, daya pengadukan dasar yang dibutuhkan oleh impeller adalah 26,20 W. Perhitungan Kecepatan Sudut

$$\omega = 2\pi n$$

$$\omega = 2 \times 3,14 \times 7,167$$

$$\omega = 45,03 \text{ rad/s}$$

Maka kecepatan sudut impeller adalah 45,03 rad/s.

6. Perhitungan Torsi Pengadukan

$$T = \frac{P}{\omega}$$

$$T = \frac{26,20}{45,03}$$

$$T = 0,582 \text{ N.m}$$

Jadi torsi dasar yang dibutuhkan untuk proses pengadukan adalah 0,582 N.m.

7. Konversi Torsi ke kg.cm

$$1 \text{ N.m} = 10,197 \text{ kg.cm}$$

$$T = 0,582 \times 10,197$$

$$T = 5,94 \text{ kg.cm}$$

8. Perhitungan Torsi Motor dengan Faktor Keamanan

$$T_{motor\ awal} = SF \times T$$

$$T_{motor\ awal} = 3 \times 5.94$$

$$T_{motor\ awal} = 17,82 \text{ kg.cm}$$

SF = 3 Karena sistem pengadukan memiliki beban dinamis dan karakteristik fluida yang dapat berubah selama proses pencampuran, sehingga diperlukan cadangan torsi yang cukup agar motor tidak bekerja pada batas maksimumnya.

9. Koreksi Panjang Shaft

Karena shaft memiliki panjang 32 cm, maka digunakan faktor koreksi shaft sebesar 1,3.

Berdasarkan kriteria faktor koreksi poros pada Bab II, sistem pengaduk cat termasuk dalam kategori beban dengan sedikit kejutan atau tumbukan. Hal ini disebabkan karena shaft mulai berputar dari keadaan diam dan impeller langsung menerima hambatan dari fluida cat yang memiliki viskositas cukup tinggi. Oleh karena itu, digunakan nilai $K_s = 1,3$ sebagai nilai koreksi menengah dalam rentang 1,0–1,5 untuk kondisi sedikit kejutan atau tumbukan.

Torsi motor setelah koreksi shaft dihitung dengan persamaan:

$$T_{motor\ akhir} = K_s \times T_{motor}$$

$$T_{motor\ akhir} = 1,3 \times 17,82$$

$$T_{motor\ akhir} = 23,17 \text{ kg.cm}$$

$$T_{motor\ minimum} \approx 23,17 \text{ kg.cm}$$

Hasil perhitungan torsi motor DC yang dibutuhkan untuk menggerakkan mekanisme pengaduk ditunjukkan pada Tabel 3.11.

Tabel 3. 11. Hasil Perhitungan Torsi Motor DC

Parameter	Nilai
Massa Cat	2 kg
Viskositas	90 KU
Viskositas Dinamis	10 Pa.s

Diameter Impeller	0,09 m
Diameter Wadah	0,13 m
Panjang Shaft	0,32 m
Kecepatan Putar Motor	430 RPM
Reynolds Number	8,60
Power Number	8,14
Daya Pengadukan	26,20 W
Torsi Pengadukan	5,94 kg.cm
Faktor Keamanan	3
Torsi Minimum Motor Sebelum Koreksi Shaft	17,82 kg.cm
Faktor Koreksi Shaft	1,3
Torsi Minimum Motor Setelah Koreksi Shaft	23,17kg
Torsi Motor yang Digunakan	51 kg.cm.

3.4.7. Program Pemilihan Warna dan Komposisi Cat

Program pemilihan warna dan komposisi cat digunakan untuk menentukan warna target serta massa setiap warna dasar yang akan dikeluarkan oleh pompa. Sistem menyediakan sepuluh pilihan warna campuran yang disimpan dalam database program. Setiap warna memiliki komposisi dalam bentuk persentase dengan urutan channel biru, hitam, kuning, putih, dan merah. Total persentase setiap resep ditetapkan sebesar 100% agar sesuai dengan target campuran 500 g.

Potongan program yang mendefinisikan database nama warna beserta komposisinya ditunjukkan pada Tabel 3.12.

Tabel 3. 12. Potongan program database nama warna dan komposisi cat

```
const uint8_t TOTAL_WARNA = 10;

const char* NAMA_WARNA[TOTAL_WARNA] = {
    "VIOLET",
```

```

"SOFT PINK",
"SKY BLUE",
"ORANGE",
"KUNING EMAS",
"HIJAU",
"UNGU",
"SIAN",
"HIJAU ZAITUN",
"KUNING PASTEL"
};

// Urutan kolom: Biru, Hitam, Kuning, Putih, Merah
const                                     uint8_t
RESEP_PERSEN[TOTAL_WARNA][JUMLAH_POMPA]
= {
    {95, 0, 0, 0, 5},
    { 0, 0, 0, 95, 5},
    {99, 0, 0, 1, 0},
    { 0, 0, 52, 0, 48},
    { 0, 0, 99, 0, 1},
    {50, 0, 50, 0, 0},
    {50, 0, 0, 0, 50},
    {96, 0, 4, 0, 0},
    { 0, 2, 98, 0, 0},
    { 0, 0, 1, 99, 0}
};

```

Berdasarkan Tabel 3.9, nama warna target disimpan pada array NAMA_WARNA, sedangkan komposisi masing-masing warna disimpan pada array RESEP_PERSEN. Setiap baris menunjukkan satu resep warna, sedangkan setiap kolom menunjukkan

persentase warna dasar sesuai urutan pompa. Penyimpanan dalam bentuk array memudahkan program mengambil komposisi berdasarkan indeks warna yang dipilih operator.

Potongan program untuk menghitung target massa tiap komponen warna ditunjukkan pada Tabel 3.13.

Tabel 3. 13. Program Perhitungan Target Massa Komponen

```
void hitungTargetKomponen(uint8_t indexWarna,
float hasil[JUMLAH_POMPA]) {
    for (uint8_t i = 0; i < JUMLAH_POMPA; i++) {
        hasil[i] = TARGET_MIXING_G *
        ((float)RESEP_PERSEN[indexWarna][i] / 100.0f);
    }
}
```

Berdasarkan Tabel 3.13, ditampilkan potongan program yang digunakan untuk mengimplementasikan fungsi tersebut pada sistem. Fungsi `hitungTargetKomponen()` digunakan untuk mengubah komposisi warna dari bentuk persentase menjadi target massa dalam satuan gram. Perhitungan dilakukan berdasarkan target total campuran 500 g, kemudian hasilnya disimpan untuk masing-masing pompa.

Potongan program yang memproses pilihan warna dari input pengguna melalui touchscreen ditunjukkan pada Tabel 3.14.

Tabel 3. 14. Program Pemrosesan Pilihan Warna pada *Touchscreen*

```
if (tombolDitekan(btnWarna[i], x, y)) {
    colorIndex = (int8_t)index;
    hitungTargetKomponen(index, targetKomponen);
    ubahState(KONFIRMASI_RESEP);
    return;
}
```

Berdasarkan Tabel 3.14, ditampilkan potongan program yang digunakan untuk mengimplementasikan fungsi tersebut pada sistem. Program ini mendeteksi tombol warna yang dipilih operator, menyimpan indeks warna, menjalankan perhitungan target massa setiap komponen, kemudian memindahkan tampilan ke halaman konfirmasi resep.

Dengan program tersebut, pemilihan warna pada LCD TFT terhubung langsung dengan database komposisi dan perhitungan target massa. Nilai target yang dihasilkan selanjutnya digunakan oleh *Sequential Control* untuk menentukan pompa yang perlu dijalankan dan jumlah cat yang harus ditambahkan.

3.4.8. Program Pengendalian Pompa Secara *Sequential*

Potongan program pengendalian aktivasi pompa secara bergantian (sequential control) ditunjukkan pada Tabel 3.15.

Tabel 3. 15. Potongan program pengendalian aktivasi pompa pada *Sequential Control*

```
void setPompaPWM(uint8_t indexPompa, uint8_t pwm) {
    if (indexPompa >= JUMLAH_POMPA) {
        semuaPompaOff();
        return;
    }

    if (pwm == 0) {
        analogWrite(PIN_POMPA[indexPompa], 0);
        if (pompaAktif == (int8_t)indexPompa) {
            pompaAktif = -1;
            pwmPompaAktif = 0;
        }
        return;
    }

    // Perintah hanya dikirim ulang jika channel atau PWM
    berubah.
```

```

if (pompaAktif == (int8_t)indexPompa &&
    pwmPompaAktif == pwm) {
    return;
}

semuaPompaOff();
analogWrite(PIN_POMPA[indexPompa], pwm);
pompaAktif = (int8_t)indexPompa;
pwmPompaAktif = pwm;
}

```

Berdasarkan Tabel 3.15, ditampilkan potongan program yang digunakan untuk mengimplementasikan fungsi tersebut pada sistem. Fungsi `setPompaPWM()` digunakan untuk mengendalikan pompa berdasarkan indeks pompa dan nilai PWM yang diberikan oleh program. Pada awal proses, indeks pompa diperiksa untuk memastikan nilainya masih berada dalam jumlah pompa yang tersedia. Jika indeks tidak valid, seluruh pompa dimatikan sebagai tindakan pengamanan. Ketika nilai PWM bernilai 0, pompa yang dipilih dihentikan dan status pompa aktif dikosongkan. Jika pompa dan nilai PWM yang diberikan masih sama dengan kondisi sebelumnya, program tidak mengirimkan perintah ulang agar proses pengendalian lebih efisien. Sebelum pompa baru diaktifkan, seluruh pompa dimatikan terlebih dahulu, kemudian pompa terpilih dijalankan menggunakan `analogWrite()` sesuai nilai PWM yang ditentukan. Mekanisme ini memastikan hanya satu pompa yang aktif pada setiap tahap sehingga mendukung proses dosing secara *sequential*.

3.4.9. Program *Two-stage Dosing*

Potongan program pengaturan PWM pada tahap cepat dan tahap presisi ditunjukkan pada Tabel 3.16.

Tabel 3. 16. Program PWM CEPAT DAN PRESISI

```

const uint8_t PWM_CEPAT = 255;
const uint8_t PWM_PREISI = 120;

```

Potongan program pengendalian PWM pada metode two-stage dosing berdasarkan massa aktual yang terbaca ditunjukkan pada Tabel 3.17.

Tabel 3. 17. Potongan program pengendalian *Two-stage Dosing* berdasarkan massa aktual

```

if (berat >= batasStopTahap) {
    setPompaPWM((uint8_t)idxTahap, 0);
    waktuMulaiStabil = millis();
    dosingPhase = DOSING_TUNGGU_STABIL;
}
else if (berat >= batasSwitchTahap) {
    dosingPhase = DOSING_PRECISI;
    setPompaPWM((uint8_t)idxTahap,
PWM_PRECISI);
}
else {
    dosingPhase = DOSING CEPAT;
    setPompaPWM((uint8_t)idxTahap,
PWM CEPAT);
}

```

Berdasarkan Tabel 3.17, ditampilkan potongan program yang digunakan untuk mengimplementasikan fungsi tersebut pada sistem. Potongan program tersebut mengatur proses PWM *Two-stage Dosing* berdasarkan massa aktual yang dibaca oleh *load cell*. Program terlebih dahulu memeriksa batas penghentian. Jika massa telah mencapai atau melebihi batasStopTahap, pompa dihentikan dengan PWM 0 dan sistem masuk ke tahap menunggu kestabilan massa. Jika batas penghentian belum tercapai, tetapi massa telah mencapai batasSwitchTahap, pompa dijalankan pada PWM_PRECISI sebesar 120 untuk memperlambat aliran. Sementara itu, apabila massa masih berada di bawah batas perpindahan, pompa dijalankan pada PWM CEPAT

sebesar 255. Perpindahan dari PWM cepat 255 menuju PWM presisi 120 dilakukan ketika massa mencapai batasSwitchTahap, sedangkan pompa dihentikan ketika massa mencapai batasStopTahap. Kedua batas tersebut dihitung menggunakan parameter Δm threshold dan kompensasi penghentian yang dijelaskan pada subbab Program *Gravimetric Dosing* Berbasis *load cell*.

3.4.10. Program *Gravimetric Dosing* Berbasis *load cell*

Program *Gravimetric Dosing* digunakan untuk mengendalikan jumlah cat yang dikeluarkan oleh pompa berdasarkan massa aktual pada tangki pencampuran. *load cell* berfungsi sebagai umpan balik selama proses dosing, sehingga pengaktifan, perpindahan kecepatan, dan penghentian pompa tidak ditentukan berdasarkan waktu. Program bekerja dengan menghitung target massa setiap tahap, membaca massa aktual, kemudian membandingkan hasil pembacaan tersebut dengan batas perpindahan dan batas penghentian yang telah ditentukan. Potongan program penentuan parameter Δm threshold dan kompensasi waktu penghentian pompa ditunjukkan pada Tabel 3.18.

Tabel 3. 18. Potongan program parameter Δm threshold dan kompensasi penghentian pompa

```
const float DELTA_M_THRESHOLD[JUMLAH_POMPA] = {
    1.881f, 2.173f, 2.197f, 1.690f, 2.256f
};

const float STOP_COMP_FINAL[JUMLAH_POMPA] = {
    1.134f, 0.750f, 0.920f, 0.590f, 0.410f
};
```

Tabel 3. 18. menunjukkan parameter pengendalian *Gravimetric Dosing* untuk setiap pompa dengan urutan biru, hitam, kuning, putih, dan merah. Array DELTA_M_THRESHOLD berisi selisih massa terhadap target yang digunakan untuk menentukan titik perpindahan dari PWM cepat 255 menuju PWM presisi 120. Sementara itu, array STOP_COMP_FINAL berisi nilai kompensasi penghentian yang digunakan untuk mematikan pompa sebelum target tercapai. Penghentian lebih awal

diperlukan karena masih terdapat sisa aliran cat setelah pompa dimatikan. Nilai setiap pompa dibuat berbeda karena karakteristik aliran dan sisa aliran masing-masing pompa tidak sama.

Potongan program penentuan target massa dan batas toleransi pada proses gravimetric dosing ditunjukkan pada Tabel 3.19

Tabel 3. 19. Potongan program penentuan target dan batas *Gravimetric Dosing*

```
idxTahap = (int8_t)indexPompa;
beratAwalTahap = beratAwal;
targetTahap = beratAwalTahap + targetKomponen[indexPompa];
batasSwitchTahap = targetTahap - DELTA_M_THRESHOLD[indexPompa];
batasStopTahap = targetTahap - STOP_COMP_FINAL[indexPompa];
```

Pada Tabel 3.19 parameter DELTA_M_THRESHOLD dan STOP_COMP_FINAL dipanggil berdasarkan indeks pompa yang sedang aktif. Nilai Δm threshold dikurangkan dari target tahap untuk menghasilkan batas switch, sedangkan kompensasi stop dikurangkan dari target tahap untuk menghasilkan batas penghentian pompa. Dengan demikian, setiap pompa memiliki titik perpindahan PWM dan titik penghentian yang disesuaikan dengan karakteristik alirannya.

Potongan program pembacaan massa aktual pada tangki pencampuran secara real-time ditunjukkan pada Tabel 3.20.

Tabel 3. 20. potongan program pembacaan massa aktual pada tangki pencampuran

```
if (dosingPhase == DOSING_CEPAT || dosingPhase == DOSING_PRESIISI)
{
    float berat;
    if (!bacaBeratmixing(berat)) {
        masukErrorState("LOAD CELL MIXING TIDAK SIAP");
        return false;
    }
}
```

Tabel 3. 20. menunjukkan bahwa pembacaan massa dilakukan selama sistem berada pada tahap DOSING_CEPAT atau DOSING_PRECISI. Nilai massa aktual dari *load cell* dibaca melalui fungsi *bacaBerat mixing()* dan disimpan pada variabel *berat*. Nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai umpan balik dalam pengendalian pompa. Apabila HX711 atau *load cell* tidak dapat memberikan data yang valid, program memindahkan sistem ke kondisi error dan menghentikan proses dosing untuk mencegah pompa bekerja tanpa pemantauan massa.

Potongan program pengendalian aktivasi dan penghentian pompa berdasarkan batas massa yang ditentukan ditunjukkan pada Tabel 3.21.

Tabel 3. 21. Potongan program pengendalian pompa berdasarkan batas massa

```

if (berat >= batasStopTahap) {
    if (!massaSwitchSudahDicatat) {
        massaSwitchSudahDicatat = true;
        logAktif.massaSaatSwitch = berat;
        waktuMulaiPresisi = millis();
    }
    setPompaPWM((uint8_t)idxTahap, 0);
    logAktif.massaSaatOff = berat;
    waktuMulaiStabil = millis();
    dosingPhase = DOSING_TUNGGU_STABIL;
    screenNeedsRedraw = true;
    return false;
}
if (berat >= batasSwitchTahap) {
    if (!massaSwitchSudahDicatat) {
        massaSwitchSudahDicatat = true;
        logAktif.massaSaatSwitch = berat;
        waktuMulaiPresisi = millis();
    }
}

```

```

    dosingPhase = DOSING_PREISI;
    setPompaPWM((uint8_t)idxTahap, PWM_PREISI);
}
else {
    dosingPhase = DOSING_CEPAT;
    setPompaPWM((uint8_t)idxTahap, PWM_CEPAT);
}

```

Berdasarkan Tabel 3.21, massa aktual dibandingkan dengan batasSwitchTahap dan batasStopTahap. Jika massa masih berada di bawah batas switch, pompa dijalankan pada tahap cepat menggunakan PWM_CEPAT. Setelah massa mencapai batas switch, program mengubah tahap dosing menjadi presisi dan menjalankan pompa menggunakan PWM_PREISI. Ketika massa telah mencapai batas stop, pompa dihentikan dengan memberikan nilai PWM 0, kemudian sistem masuk ke tahap DOSING_TUNGGU_STABIL untuk menunggu sisa aliran berhenti sebelum massa akhir diperiksa.

Ketiga bagian program tersebut membentuk proses *Gravimetric Dosing* secara terpadu. Program terlebih dahulu menentukan target dan batas pengendalian, membaca massa aktual sebagai umpan balik, kemudian mengatur kecepatan serta penghentian pompa berdasarkan hasil pembacaan massa. Penerapan batas switch dan batas stop memungkinkan proses dosing berlangsung cepat pada tahap awal serta lebih presisi ketika mendekati target, sekaligus mengurangi overshoot akibat sisa aliran cat setelah pompa dimatikan.

3.4.11. Program Pengendalian Motor Pengaduk

Potongan program pengaktifan dan penghentian motor pengaduk pada tahap mixing ditunjukkan pada Tabel 3.22.

Tabel 3. 22. Potongan program pengaktifan dan penghentian motor pengaduk

```

void motorMixerOn(uint8_t pwm) {
    digitalWrite(PIN_REN, HIGH);
    digitalWrite(PIN_LEN, HIGH);
}

```

```

    analogWrite(PIN_RPWM, pwm);
    analogWrite(PIN_LPWM, 0);
}
void motorMixerOff() {
    analogWrite(PIN_RPWM, 0);
    analogWrite(PIN_LPWM, 0);
    digitalWrite(PIN_REN, LOW);
    digitalWrite(PIN_LEN, LOW);
}

```

Pada Tabel 3.22. Fungsi `motorMixerOn()` digunakan untuk mengaktifkan driver BTS7960 dan menjalankan motor pengaduk pada nilai PWM yang ditentukan. Pin RPWM digunakan sebagai sinyal putaran motor, sedangkan LPWM dibuat bernilai 0 karena arah putaran motor ditetapkan satu arah. Fungsi `motorMixerOff()` menghentikan motor dengan memberikan nilai PWM 0 dan menonaktifkan kedua pin enable driver.

Potongan program pengaturan durasi waktu proses mixing ditunjukkan pada Tabel 3.23.

Tabel 3. 23. Potongan program pengaturan waktu proses mixing

```

case MIXING_AWAL:
    if (millis() - waktuMulaiMixing >= MIXING_AWAL_MS) {
        motorMixerOff();
        ubahState(KIRIM_READY);
    }
    break;

```

Pada Tabel 3.22. Program menghitung durasi mixing menggunakan fungsi `millis()` tanpa menghentikan keseluruhan proses mikrokontroler. Ketika waktu mixing telah mencapai durasi yang ditentukan, motor pengaduk dimatikan dan sistem berpindah ke tahap pengiriman pesan *READY* kepada raspberry Pi untuk memulai analisis warna.

3.4.12. Program Komunikasi USB Serial Arduino Dengan raspberry Pi

Program komunikasi USB Serial digunakan untuk menghubungkan arduino mega pro mini 2560 sebagai pengendali perangkat keras dengan raspberry Pi sebagai pengolah citra warna. Komunikasi dilakukan dua arah pada kecepatan 115200 bps. Setelah proses mixing selesai, arduino mengirimkan pesan *READY*, kemudian menunggu raspberry Pi mengirimkan respons berupa *KOREKSI* atau *WARNA_SESUAI*.

Potongan program pengiriman pesan status *READY* dari Arduino kepada raspberry Pi ditunjukkan pada Tabel 3.24.

Tabel 3. 24. Potongan program pengiriman pesan *READY* kepada raspberry Pi

<pre>bool kirimREADY(const char* tahap) { if (colorIndex < 0 colorIndex >= (int8_t)TOTAL_WARNA) { return false; } if (tahap == NULL (strcmp(tahap, "MIXING_AWAL") != 0 && strcmp(tahap, "MIXING_KOREKSI") != 0)) { return false; } // Buang respons lama atau fragmen sisa sebelum membuka satu siklus <i>READY</i> baru.</pre>	<pre>// Format final arduino --> raspberry Pi: // // <i>READY</i>;BATCH- 1;STEP=MIXING_AWAL;WARNA=VIOLET Serial.print(F("<i>READY</i>;BATCH- 1;STEP=")); Serial.print(tahap); Serial.print(F(";WARNA=")); Serial.println(NAMA_WARNA[colorIndex]); return true; }</pre>
--	--

<pre>// Pembersihan dilakukan sebelum <i>READY</i>, tidak pernah setelah <i>READY</i> dikirim. bersihkanBufferarduino();</pre>	
---	--

Berdasarkan Gambar 3.24, fungsi kirim*READY*() digunakan untuk memberi tahu raspberry Pi bahwa proses mixing telah selesai dan cat siap dianalisis. Sebelum pesan dikirim, program memeriksa validitas warna dan tahap mixing. Pesan memuat nomor batch, tahap proses, serta nama warna target, misalnya *READY;BATCH=1;STEP=MIXING_AWAL;WARNA=VIOLET*. Fungsi Serial.println() memberikan karakter newline sebagai penanda akhir pesan agar satu baris data dapat dibaca secara utuh oleh raspberry Pi.

Potongan program penerimaan data melalui komunikasi USB Serial dari raspberry Pi ditunjukkan pada Tabel 3.25.

Tabel 3. 25. Potongan program penerimaan data USB Serial dari raspberry Pi

<pre>while (Serial.available() > 0) { const char karakter = (char)Serial.read(); if (karakter == '\n') { if (serialRxOverflow) { resetPenerimaSerial(); keluaran[0] = '\0'; return SERIAL_BUFFER_OVERFLOW; } // Mendukung terminator \r\n maupun \n, tetapi karakter \r di tengah // pesan tetap dipertahankan agar parser tetap dapat menolakny. if (serialRxIndex > 0 && keluaran[serialRxIndex - 1] == '\r') { serialRxIndex--; } if (serialRxIndex ==</pre>	<pre>keluaran[serialRxIndex] = '\0'; serialRxIndex = 0; serialRxOverflow = false; return SERIAL_BARIS_VALID; } if (serialRxOverflow) { // Setelah overflow, seluruh sisa baris dibuang sampai newline. continue; } if (serialRxIndex < panjangKeluaran - 1) { keluaran[serialRxIndex++] = karakter; } else { serialRxOverflow = true; } }</pre>
---	--

0) { // Baris kosong diabaikan. continue; }	
--	--

Tabel 3. 25. menunjukkan proses penerimaan pesan secara bertahap dari buffer USB Serial. Setiap karakter dibaca dan disimpan sampai ditemukan karakter newline sebagai batas akhir pesan. Program juga menangani format akhir baris \n maupun \r\n, mengabaikan baris kosong, serta mendeteksi apabila panjang pesan melebihi kapasitas buffer. Pesan hanya diteruskan ke tahap pemeriksaan ketika telah diterima dalam satu baris yang lengkap.

Potongan program pemrosesan respons KOREKSI dan WARNA_SESUAI dari hasil pembacaan sensor warna ditunjukkan pada Tabel 3.26.

Tabel 3. 26. Potongan program pemrosesan respons KOREKSI dan WARNA_SESUAI

```

if (parsePesanKoreksi(serialBuf, koreksiSementara, errorPesan)) {
    float beratSekarang;
    if (!cekStabilMixing(beratSekarang)) {
        masukErrorState("MASSA MIXING TIDAK STABIL SAAT KOREKSI");
        break;
    }
    float totalKoreksi = 0.0f;
    for (uint8_t i = 0; i < JUMLAH_POMPA; i++) {
        totalKoreksi += koreksiSementara[i];
    }
    if (beratSekarang + totalKoreksi > KAPASITAS_MIX_TANK_G) {
        masukErrorState("KOREKSI MELEBIHI KAPASITAS 2000 g");
        break;
    }
    errorHSVTerakhir = errorPesan;
    for (uint8_t i = 0; i < JUMLAH_POMPA; i++) {

```

```

        koreksiGram[i] = koreksiSementara[i];
        targetKomponen[i] = koreksiSementara[i];
    }
    sedangDosingKoreksi = true;
    idxTahap = -1;
    dosingPhase = DOSING_IDLE;
    ubahState(DOSING_KOREKSI);
    break;
}
if (parsePesanWarnaSesuai(serialBuf, errorPesan)) {
    errorHSVTerakhir = errorPesan;
    semuaPompaOff();
    motorMixerOff();
    tutupValve();
    ubahState(WARNA_SESUAI_STATE);
    break;
}
masukErrorState("DATA USB SERIAL TIDAK VALID");
break;

```

Berdasarkan Gambar 3.26, data yang diterima diperiksa menggunakan parser sesuai format pesan. Apabila raspberry Pi mengirimkan KOREKSI, nilai massa koreksi untuk pompa biru, hitam, kuning, putih, dan merah disimpan sebagai target dosing baru, kemudian sistem berpindah ke proses dosing koreksi. Pesan KOREKSI hanya diterima ketika error HSV lebih dari 10%. Apabila pesan yang diterima adalah WARNA_SESUAI dengan error HSV kurang dari atau sama dengan 10%, seluruh aktuator dihentikan dan sistem melanjutkan ke proses output. Pesan yang tidak memenuhi format akan menyebabkan sistem masuk ke kondisi error.

Ketiga bagian program tersebut membentuk komunikasi dua arah antara arduino dan raspberry Pi. arduino mengirimkan status kesiapan analisis melalui pesan *READY*, menerima respons dalam bentuk satu baris data, kemudian menjalankan proses koreksi

atau proses output sesuai hasil analisis HSV. Pemeriksaan format, jumlah field, batas error, newline, dan kapasitas buffer digunakan untuk mencegah data komunikasi yang tidak lengkap atau tidak valid diproses oleh sistem.

3.4.13. Program Eksekusi Dosing Koreksi Warna

Program eksekusi dosing koreksi digunakan untuk menambahkan warna dasar berdasarkan hasil analisis HSV dari raspberry Pi. Program dijalankan ketika arduino menerima pesan KOREKSI dengan error warna lebih dari 10%. Nilai koreksi dalam satuan gram dipetakan menjadi target masing-masing pompa, kemudian diproses menggunakan *Sequential Control*, PWM two-stage, dan *Gravimetric Dosing* yang sama seperti proses dosing awal.

Potongan program penentuan target dosing koreksi warna ditunjukkan pada Tabel 3.27.

Tabel 3. 27. Potongan program penentuan target dosing koreksi warna

```
float errorPesan = 0.0f;
float koreksiSementara[JUMLAH_POMPA] = {0, 0, 0, 0, 0};
if (parsePesanKoreksi(serialBuf, koreksiSementara, errorPesan)) {
    float beratSekarang;
    if (!cekStabilMixing(beratSekarang)) {
        masukErrorState("MASSA MIXING TIDAK STABIL SAAT KOREKSI");
        break;
    }
    float totalKoreksi = 0.0f;
    for (uint8_t i = 0; i < JUMLAH_POMPA; i++) {
        totalKoreksi += koreksiSementara[i];
    }
    if (beratSekarang + totalKoreksi > KAPASITAS_MIX_TANK_G) {
        masukErrorState("KOREKSI MELEBIHI KAPASITAS 2000 g");
        break;
    }
}
```

```

errorHSVTerakhir = errorPesan;
for (uint8_t i = 0; i < JUMLAH_POMPA; i++) {
    koreksiGram[i] = koreksiSementara[i];
    targetKomponen[i] = koreksiSementara[i];
}
sedangDosingKoreksi = true;
idxTahap = -1;
dosingPhase = DOSING_IDLE;
ubahState(DOSING_KOREKSI);
break;
}

```

Berdasarkan Gambar 3.27, program menjumlahkan seluruh massa koreksi yang diterima dari raspberry Pi dan memeriksa apakah massa aktual ditambah total koreksi masih berada di bawah kapasitas tangki pencampuran. Setelah dinyatakan aman, nilai koreksi warna biru, hitam, kuning, putih, dan merah disimpan pada array `targetKomponen` sebagai target dosing baru. Program kemudian mengaktifkan status dosing koreksi dan memindahkan sistem ke state `DOSING_KOREKSI`.

Potongan program pelaksanaan dosing koreksi warna secara sequential ditunjukkan pada Tabel 3.28.

Tabel 3. 28. Potongan program pelaksanaan dosing koreksi secara sequential

```

case DOSING_KOREKSI: {
    const bool selesai = updateDosingSequential();
    if (state == ERROR_STATE) break;
    if (selesai) {
        semuaPompaOff();
        waktuMulaiMixing = millis();
        motorMixerOn(PWM_MIXER);
        ubahState(MIXING_KOREKSI);
    }
}

```

```

    }
    break;
}

```

Tabel 3.28. menunjukkan bahwa target koreksi diproses melalui fungsi `updateDosingSequential()`. Fungsi tersebut menjalankan pompa satu per satu sesuai nilai koreksi yang lebih dari 0 g. Selama proses berlangsung, massa tetap dipantau oleh *load cell* dan pompa dikendalikan menggunakan PWM cepat serta PWM presisi. Setelah seluruh komponen koreksi selesai ditambahkan, semua pompa dimatikan, motor pengaduk diaktifkan, dan sistem berpindah ke tahap MIXING_KOREKSI.

Potongan program pengiriman pesan *READY* oleh Arduino pada tahap MIXING_KOREKSI ditunjukkan pada Tabel 3.29.

Tabel 3. 29. Potongan program arduino mengirimkan pesan *READY* dengan tahap MIXING_KOREKSI

```

case MIXING_KOREKSI:
    if (millis() - waktuMulaiMixing >= MIXING_KOREKSI_MS) {
        motorMixerOff();

        if (! kirimREADY("MIXING_KOREKSI")) {
            masukErrorState("GAGAL MENGIRIM READY");
            break;
        }

        ubahState(TUNGGU_RASPBERRY_PI);
    }
    break;

```

Berdasarkan Tabel 3. 29., setelah dosing koreksi selesai, motor mengaduk campuran selama durasi yang ditentukan oleh MIXING_KOREKSI_MS. Setelah waktu mixing tercapai, motor dimatikan dan arduino mengirimkan pesan *READY* dengan tahap

MIXING_KOREKSI. Sistem kemudian kembali menunggu raspberry Pi untuk melakukan pengambilan citra dan analisis HSV ulang. Siklus koreksi akan diulangi apabila error masih lebih dari 10%, sedangkan proses dilanjutkan ke output apabila warna telah sesuai.

Ketiga bagian program tersebut menunjukkan bahwa hasil analisis HSV tidak hanya ditampilkan sebagai informasi, tetapi langsung digunakan sebagai target massa koreksi. Nilai koreksi diproses oleh pompa secara *sequential* dan gravimetrik, dilanjutkan dengan mixing ulang, kemudian cat dianalisis kembali hingga memenuhi batas error warna yang ditentukan.

3.4.14. Komposisi pencampuran warna cat

Pada subbab ini menyajikan komposisi pencampuran warna cat yang dinyatakan dalam bentuk persentase berbasis lima warna dasar, yaitu merah, kuning, biru, hitam, dan putih. Penyajian dalam persen bertujuan untuk mempermudah proses perhitungan serta implementasi pada sistem pencampuran, baik secara manual maupun otomatis.

Database komposisi pencampuran warna yang digunakan sebagai acuan sistem ditunjukkan pada Tabel 3.30.

Tabel 3. 30. Database Komposisi Pencampuran warna

No	Warna	Merah (%)	Kuning (%)	Biru (%)	Putih (%)	Hitam (%)
1	Violet	25	0	75	0	0
2	Sky Blue	0	0	99	1	0
3	Orange	48	52	0	0	0
4	Hijau Zaitun	0	98	0	0	2
5	Hijau	0	50	50	0	0
6	Cokelat	22	35	5	33	5

Persentase komposisi warna pada Tabel 3.30. ditentukan berdasarkan hasil kalibrasi eksperimental menggunakan total massa campuran sebesar 100 gram. Penentuan komposisi dilakukan dengan mencampurkan beberapa variasi persentase warna dasar, kemudian hasil pencampuran dibandingkan dengan warna target menggunakan metode

HSV (*Hue, Saturation, Value*). Komposisi yang menghasilkan nilai HSV paling mendekati warna referensi dipilih sebagai database awal sistem. Pendekatan ini dipilih karena setiap pigmen cat memiliki karakteristik dan intensitas warna yang berbeda, sehingga perbandingan teoritis seperti 50:50 tidak selalu menghasilkan warna yang sesuai dengan target. Dengan demikian, proses koreksi warna setelah pencampuran awal dapat diminimalkan sehingga jumlah cat yang ditambahkan saat koreksi menjadi lebih sedikit, waktu pencampuran lebih singkat, dan penggunaan material lebih efisien.

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 (g)	RAW HX711 (Data Mentah)	Massa Terbaca Hasil Konversi (g)	Error (%)
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

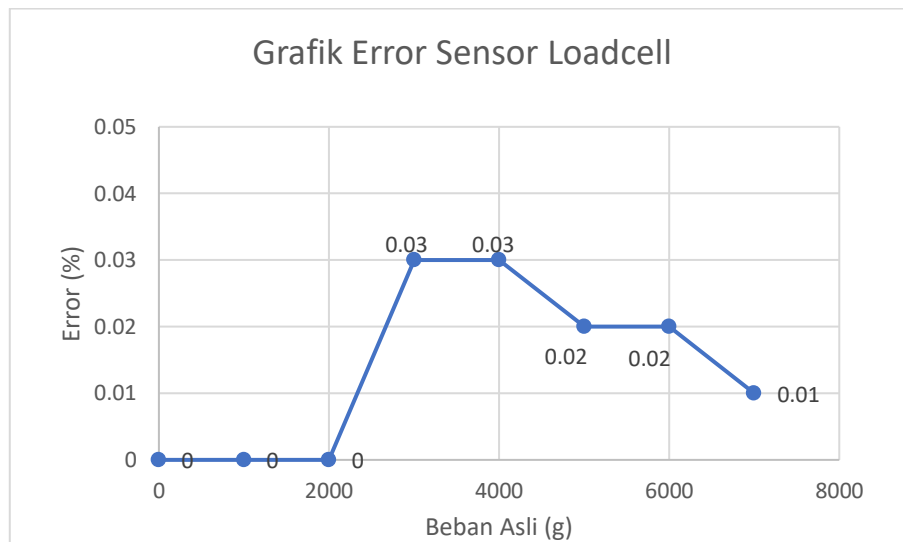
Untuk beban 0 g, error ditulis 0,00% karena pembacaan sensor juga menunjukkan 0 g setelah proses kalibrasi.

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

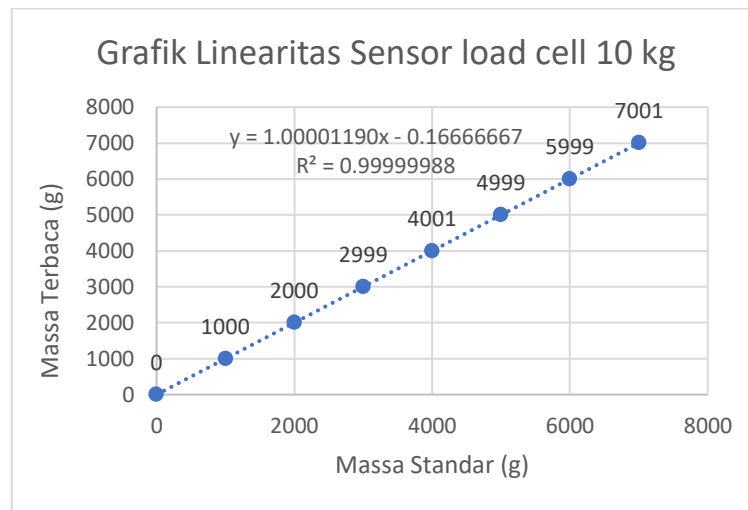
Gambar 4.16 menunjukkan grafik error hasil pengujian load cell. Pada beban 3000 g dan 4000 g, error meningkat menjadi 0,03%. Nilai ini merupakan error tertinggi pada pengujian, tetapi masih sangat kecil karena selisih pembacaan hanya sekitar 1 g dari beban asli. Setelah itu, error menurun pada beban 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 (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

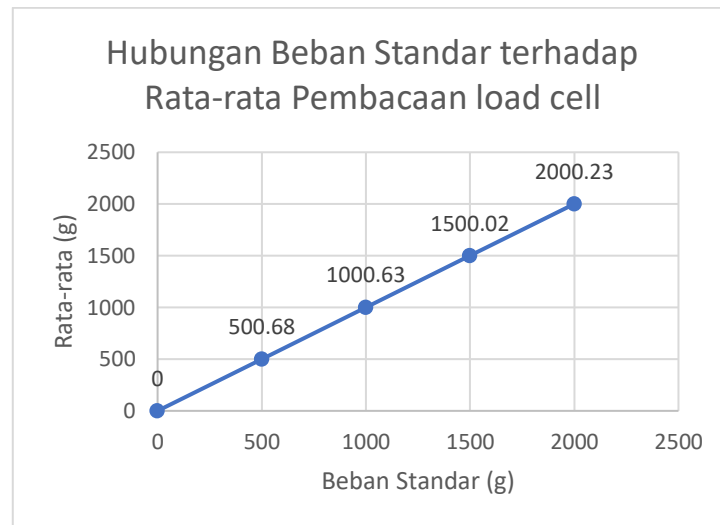
Beban Standar (g)	Rata-rata (g)	Selisih (g)	Error (%)	Akurasi (%)
500	500.68	0,68	0,14	99,86
1000	1000.63	0,63	0,06	99,94
1500	1500.02	0,02	0,00	100,00

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 (g)	Standar Deviasi (g)	CV berdasarkan 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*.

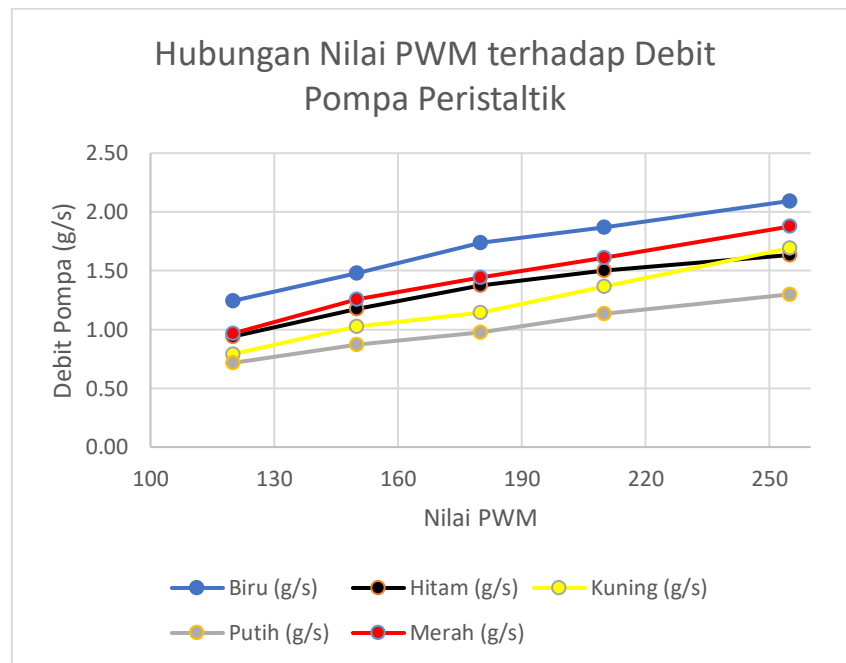
4.4.1.1. Hasil Pengujian Debit Pompa

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

Tabel 4. 6. Hasil Pengujian debit pompa

PWM	Biru (g/s)	Hitam (g/s)	Kuning (g/s)	Putih (g/s)	Merah (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	Relatif PWM 255
	(%)	(%)
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 Δm 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 255 (g/s)	Rata-rata t_{delay} (s)	$\Delta m_{\text{threshold}}$ (g)	Batas switch 50 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 batasSwitchTahap. 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	$\Delta m_{\text{threshold}}$ (g)	Batas switch 50 g (g)	Kompensasi stop final (g)	Batas stop final 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

Pompa	Percobaan	Target (g)	Massa aktual (g)	Error (g)	Error (%)
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 (g)	rata-rata (%)			
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

Warna	Massa switch rata-rata (g)	Massa OFF rata- rata (g)	Sisa aliran rata- rata (g)	Waktu tahap presisi rata- rata (s)	Waktu total rata-rata (s)
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			
		Gambar 4. 27. Sebelum Mixing 250gr	Gambar 4. 28. Waktu Mixing 250	Gambar 4. 29. Setelah mixing 250

2 500



Gambar 4. 30.
Sebelum Mixing 500



Gambar 4. 31.
Waktu Mixing
500

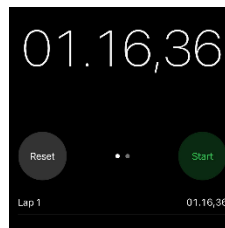


Gambar 4. 32. Setelah
Mixing 500

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

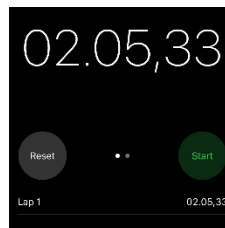


Gambar 4. 38. Setelah
Mixing 1000

5 1250



Gambar 4. 39.
Sebelum Mixing 1250

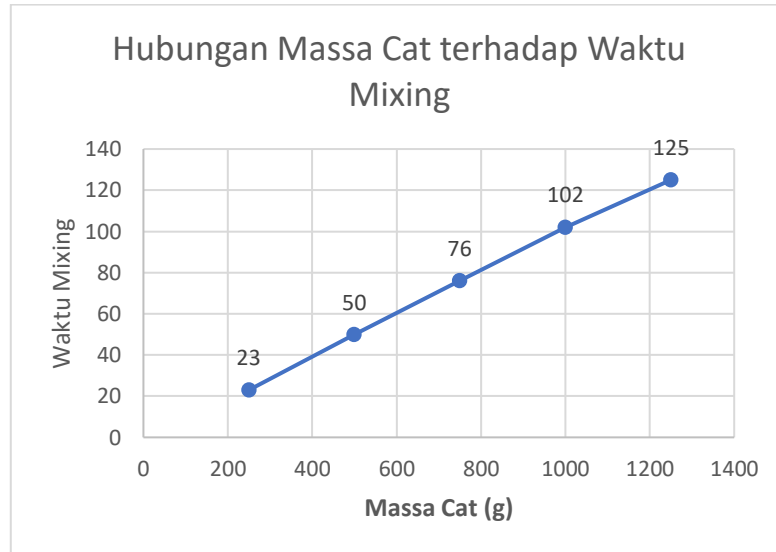


Gambar 4. 40.
Waktu Mixing
1250



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

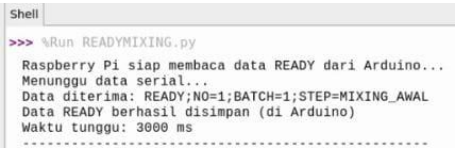
4.8.1. Pengujian Pengiriman Data *READY*

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.

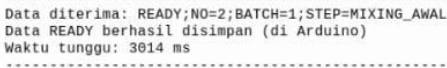
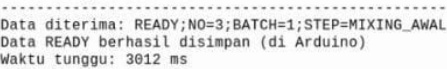
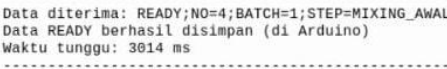
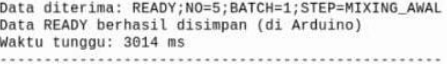
Hasil pengujian pengiriman data *READY* dari Arduino ke raspberry Pi disajikan pada Tabel 4.17. pada percobaan pertama sampai ke lima ditunjukkan pada Gambar 4.43 sampai pada Gambar 4.47. Sebagai berikut :

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

No	Dokumentasi Data Serial Diterima Raspberry Pi	Tahap Proses	Waktu	Status
			Tunggu Penerimaan (ms)	

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

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

2	Gambar 4. 44. Data serial “READY” di terima percobaan 2		<i>mixing</i>	3014	Berhasil
			awal selesai (READY;)		
3	Gambar 4. 45. Data serial “READY” di terima percobaan 3		<i>mixing</i>	3012	Berhasil
			awal selesai (READY;)		
4	Gambar 4. 46. Data serial “READY” di terima percobaan 4		<i>mixing</i>	3014	Berhasil
			awal selesai (READY;)		
5	Gambar 4. 47. Data serial “READY” di terima percobaan 5		<i>mixing</i>	3014	Berhasil
			awal selesai (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 Warna (%)	Koreksi Merah (g)	Koreksi Kuning (g)	Koreksi Biru (g)	Koreksi Putih (g)	Koreksi Hitam (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 Warna (%)	Waktu Pengiriman (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 Δm 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 Δm 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			
	Gambar 4. 53. Hasil 1 Violet	Gambar 4. 54. Hasil 2 Violet	Gambar 4. 55. Hasil 3 Violet
Sky Blue			
	Gambar 4. 56 Hasil 1 Sky Blue	Gambar 4. 57. Hasil 2 Sky Blue	Gambar 4. 58. Hasil 3 Sky Blue

Orange			
	Gambar 4. 59. Hasil 1 Orange	Gambar 4. 60. Hasil 2 Orange	Gambar 4. 61. Hasil 3 Orange
Hijau Zaitun			
	Gambar 4. 62. Hasil 1 Hijau Zaitun	Gambar 4. 63. Hasil 2 Hijau Zaitun	Gambar 4. 64. Hasil 3 Hijau Zaitun
Hijau			
	Gambar 4. 65. Hasil 1 Hijau	Gambar 4. 66. Hasil 2 Hijau	Gambar 4. 67. Hasil 3 Hijau
Cokelat			
	Gambar 4. 68. Hasil 1 Cokelat	Gambar 4. 69. Hasil 2 Cokelat	Gambar 4. 70 Hasil 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	 Gambar 4. 71. Output power supply 12 VDC tanpa beban
2	Output power supply 12 VDC	Sistem <i>Standby</i>	12 VDC	12.16 V	 Gambar 4. 72. Output power supply 12 VDC Sistem <i>Standby</i>
3	Output power supply 12 VDC	Pompa aktif	12 VDC	12.16 V	 Gambar 4. 73. Output power

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	 Gambar 4. 75. Output step-down saat Sistem <i>Standby</i>

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

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

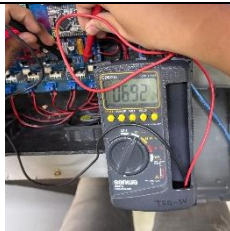
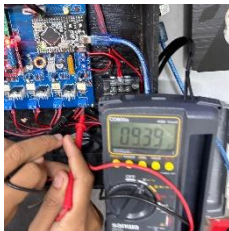
No	Pompa	Pin arduino	PWM	Duty Cycle (%)	Perhitungan Teori (V)	Tegangan Gate dan Source (V)	Tegangan Output ke Motor (V)
Ke	M1	D11	150	58,8	7,06	6.92	9.39
2	M1	D11	255	100	12,00	11.86	11.98
3	M2	D10	150	58,8	7,06	6	9
4	M2	D10	255	100	12,00	10.29	11.94
5	M3	D13	150	58,8	7,06	6.94	7.96
6	M3	D13	255	100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

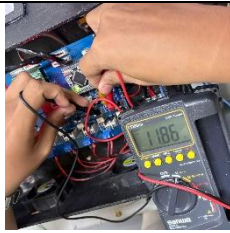
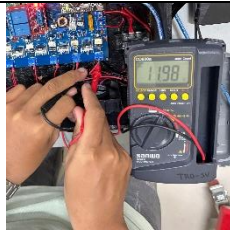
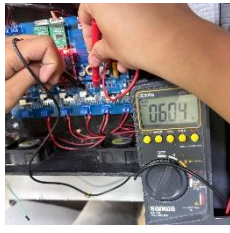
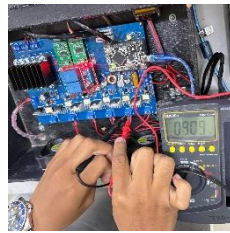
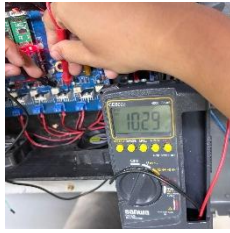
8	M4	D12	255	100	12,00	11.83	11.95
9	M5	D44	150	58,8	7,06	6.91	8.8
10	M5	D44	255	100	12,00	11.81	11.92

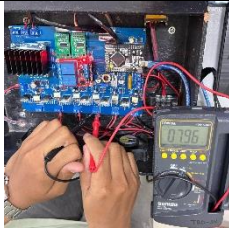
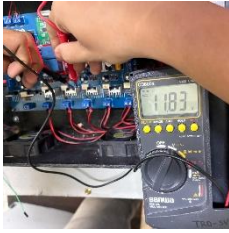
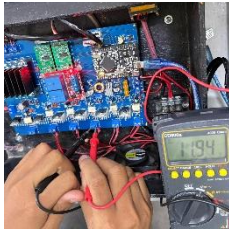
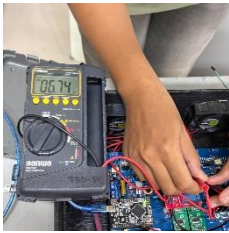
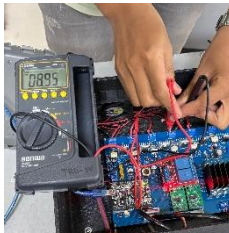
Berdasarkan Tabel 4.23, tegangan gate-source MOSFET pada PWM 150 berada pada rentang 6,00 V sampai 6,94 V. Nilai ini lebih rendah dibandingkan PWM 255 karena sinyal PWM 150 memiliki *duty cycle* yang lebih kecil. Pada kondisi tersebut, MOSFET tidak berada pada kondisi ON penuh sepanjang waktu, tetapi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

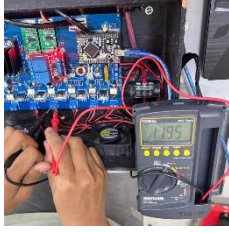
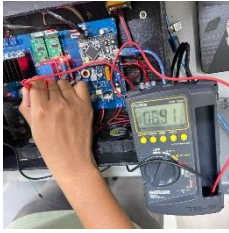
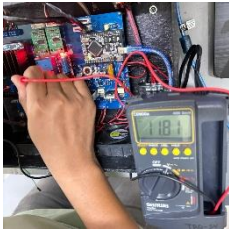
Hasil pengukuran tegangan Gate-Source dan tegangan output pada masing-masing motor (M1–M5) untuk variasi nilai PWM 150 dan 255 ditunjukkan pada Tabel 4.24, dengan dokumentasi pengukuran untuk tiap kondisi ditampilkan pada Gambar 4.79 sampai Gambar 4.98.

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

No	Pompa	PWM	Tegangan Gate dan Source (V)	Dokumentasi	Tegangan Output Motor (V)	Dokumentasi
1	M1	150	6.92		9.39	
				Gambar 4. 79. Tegangan Gate dan Source M1 PWM 150	Gambar 4. 80. Tegangan Output Motor 1 PWM 150	

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

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

8	M4	255	11.83		11.95	
				Gambar 4. 93. Tegangan Gate dan Source M4 PWM 255		Gambar 4. 94. Tegangan Output Motor 4 PWM 255
9	M5	150	6.91		8.8	
				Gambar 4. 95. Tegangan Gate dan Source M5 PWM 150		Gambar 4. 96. Tegangan Output Motor 5 PWM 150
10	M5	255	11.81		11.92	
				Gambar 4. 97. Tegangan Gate dan Source M5 PWM 255		Gambar 4. 98. Tegangan Output Motor 5 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).

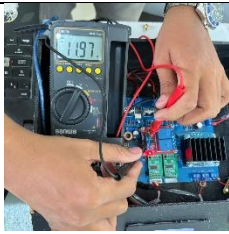
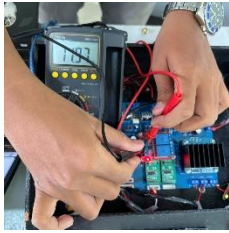
4.10.4. Hasil Pengujian Relay dan Lampu Indikator

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.

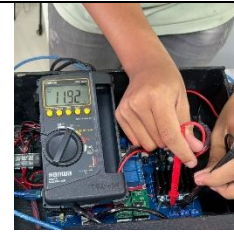
Nilai error pada pengujian ini dihitung berdasarkan persamaan error pengukuran yang telah dijelaskan pada Bab II. Hasil pengujian relay dan lampu indikator ditunjukkan pada Tabel 4.24.

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	 Gambar 4. 99. Tegangan Relay channel 1
2	Relay channel 2	ON	12 VDC	11.97 V	 Gambar 4. 100. Tegangan Relay channel 2

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.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dapat di simpulkan bahwa tugas akhir ini :

1. Sistem pencampuran warna cat otomatis berbasis cairan berhasil dirancang dan dibangun dengan memanfaatkan lima warna dasar biru, hitam, kuning, putih, dan merah sebagai sumber utama pencampuran. Realisasi sistem menggunakan Arduino Mega Pro Mini sebagai pengendali utama, lima pompa peristaltik sebagai aktuator, *load cell* 10 kg dengan modul HX711 sebagai umpan balik massa, LCD TFT sebagai antarmuka pengguna, serta rangkaian *driver* berbasis MOSFET, sehingga kelima warna dasar tersebut dapat dikeluarkan dan dicampur sesuai komposisi yang dipilih pengguna.
2. Metode *Sequential Control* berhasil diterapkan untuk mengatur urutan proses pencampuran agar pengeluaran cairan berlangsung sistematis. Hasil pengujian menunjukkan kelima pompa aktif secara bergiliran tanpa ada dua pompa yang menyala bersamaan, sehingga urutan pengeluaran warna berjalan sesuai komposisi yang ditentukan dan sesuai *flowchart* sistem yang dirancang.
3. Debit aliran cat berhasil dikendalikan melalui pengaturan kecepatan motor pompa berbasis PWM guna memperoleh massa pencampuran yang akurat. Pengujian menunjukkan hubungan berbanding lurus antara nilai PWM dan debit: pada PWM 255, debit tertinggi dicapai pompa biru sebesar 2,09 g/s, sedangkan debit terendah pada pompa putih sebesar 1,30 g/s. Kestabilan debit tetap terjaga pada pengulangan, dengan persentase rentang relatif (RR) di bawah 5%, yaitu 1,28–3,00% pada PWM 120 dan 0,53–2,08% pada PWM 255.
4. Metode *gravimetric* berbasis sensor berat berhasil diimplementasikan untuk menentukan jumlah cairan yang dikeluarkan secara tepat berdasarkan pengukuran massa. Kalibrasi *load cell* menghasilkan hubungan yang sangat linier terhadap beban referensi, dengan persamaan regresi $y = 1,0000119x - 0,1667$, $R^2 = 0,999999884$, error pembacaan maksimum 0,03%, dan rata-rata error 0,016% pada rentang 1.000–7.000 gram. Penerapan *Two-stage Dosing* (PWM 255 tahap cepat,

PWM 120 tahap presisi) pada target massa 50 gram menghasilkan error rata-rata antara 0,157% (pompa biru) hingga 0,285% (pompa putih), dengan koefisien variasi seluruh warna di bawah 0,3%.

5. Evaluasi kinerja sistem hasil integrasi *Sequential Control*, *PWM Two-stage Dosing*, dan *Gravimetric Dosing* menunjukkan akurasi penakaran cairan yang baik dan konsisten. Pada pengujian berulang tingkat individu, error terkecil tercatat 0,008% (pompa hitam) dan error terbesar 0,576% (pompa putih), sedangkan error rata-rata seluruh warna pada target 50 gram tetap berada di bawah 0,3% dengan koefisien variasi yang juga di bawah 0,3%. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi ketiga metode mampu meningkatkan akurasi penakaran cairan pada sistem pencampuran cat otomatis.

5.2. Saran

1. Penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan sistem dengan menerapkan kontrol adaptif atau closed-loop pada pengaturan PWM, sehingga nilai PWM dapat menyesuaikan karakteristik debit masing-masing pompa secara otomatis untuk meningkatkan akurasi penakaran.
2. Pengujian dapat diperluas menggunakan lebih banyak variasi komposisi warna, volume pencampuran, dan jenis cat untuk mengevaluasi konsistensi performa sistem pada berbagai kondisi operasi.
3. Antarmuka pengguna (HMI) dapat dikembangkan dengan menambahkan fitur penyimpanan riwayat pencampuran, pencatatan data (data logging), serta variasi gram total satu siklus, sehingga sistem lebih mudah digunakan pada aplikasi skala industri maupun laboratorium.
4. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan pompa dengan kapasitas debit yang lebih besar atau mengoptimalkan spesifikasi pompa peristaltik yang digunakan agar waktu pencampuran dapat dipersingkat tanpa mengurangi akurasi penakaran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Khoirul Anaam, T. Hidayat, R. Yuga Pranata, H. Abdillah, and A. Yhuto Wibisono Putra, “Pengaruh trend otomasi dalam dunia manufaktur dan industri,” *Jl. Ciwaru Raya NoVOCATIONAL EDUCATION NATIONAL SEMINAR (VENS)*, vol. 25, Jun. 2022.
- [2] I. Listyani and M. Suryanto, “PENGENDALIAN KUALITAS PRODUK CAT DENGAN MENGGUNAKAN METODE STATISTICAL PROCESS CONTROL (SPC),” vol. 1, 2012.
- [3] M. Senda Astara and H. Buwono, “Analisis Tingkat Homogenitas Pencampuran Pada Mesin Mixing Dengan Menggunakan Metode ANOVA,” *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 2, p. 9, May 2025, doi: 10.47134/jme.v2i2.4016.
- [4] Haji Wijaya Sulaiman, “RANCANG BANGUN ALAT PENCAMPURAN CAT AIR 3 WARNA DASAR BERSBASIS MIKROKONTROLER,” vol. 8, Jun. 2025.
- [5] M. MacDonald, M. de Huu, R. Maury, and O. B  ker, “Calibration of hydrogen Coriolis flow meters using nitrogen and air and investigation of the influence of temperature on measurement accuracy,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 79, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.101915.
- [6] D. T. Laksono, “IMPLEMENTASI KENDALI BERURUTAN OTOMATIS BERBASIS LIMIT SWITCH PADA MODUL PRAKTIKUM PLC OMRON CP1E UNTUK PEMBELAJARAN OTOMASI INDUSTRI,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 14, no. 1, Jan. 2026, doi: 10.23960/jitet.v14i1.8326.
- [7] I. V. Uvarov, A. E. Melenev, R. V. Selyukov, and V. B. Svetovoy, “Improving the performance of the fast electrochemical actuator,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 315, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.sna.2020.112346.
- [8] T. A. Rahmandika and F. Eliza, “Perancangan Sistem Pencampuran Cat Berbasis Mikrokontroler,” *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 3, no. 1, pp. 209–222, Apr. 2022, doi: 10.24036/jtein.v3i1.235.
- [9] S. S. Khedkar *et al.*, “Study of Liquid Dispensing and Mixing in Fluid Handling Systems-A Review Article,” *International Journal of*

Advances in Engineering and Management (IJAEM, vol. 2, p. 555, 2020, doi: 10.35629/5252-0212555559.

- [10] H. Bangun and A. Ulinuha, “RANCANG BANGUN ALAT PENCAMPUR DESINFEKTAN OTOMATIS (STUDI KASUS PENCEGAHAN PANDEMI COVID-19),” *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 22, no. 1, pp. 92–98, Mar. 2022, doi: 10.23917/emitor.v22i1.15710.
- [11] F. N. Santamaría Alvarez, P. Kleinebudde, and J. Thies, “Influence of refilling on dosing accuracy of loss-in-weight powder feeders in continuous manufacturing,” *Powder Technol.*, vol. 436, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2024.119501.
- [12] A. Arfiansyah, P. Wanarti Rusimamto, and L. Anifah, “Penggunaan Sensor Waterflow YF-S401 Pada Sistem Pencampur Parrfum Otomatis Berbasis Android 160 Penggunaan Sensor Waterflow YF-S401 Pada Sistem Pencampur Parfum Otomatis Berbasis Android,” vol. 13, pp. 160–167, 2024.
- [13] B. Catur Wibowo, A. Triwiyatno, and dan Sudjadi, “PERANCANGAN PENGATURAN KECEPATAN MOTOR DC PADA MESIN SABLON KAOS DENGAN PULSE WIDTH MODULATION (PWM),” Mar. 2023. [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient>
- [14] S. I. Palomino-Resendiz, F. A. Ortiz-Martinez, I. V. Paramo-Ortega, J. M. Gonzalez-Lira, and D. A. Flores-Hernandez, “Optimal Selection of the Control Strategy for Dual-Axis Solar Tracking Systems,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 56561–56573, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3283336.
- [15] J. Sistem and K. Tgd, “Monitoring Radiator Mobil Menggunakan Teknik PWM Berbasis Mikrokontroller,” vol. 1, no. 6, pp. 278–286, 2022, [Online]. Available: <https://ojs.trigunadharma.ac.id/index.php/jskom>
- [16] B. Satria, H. Alam, A. Darma Trg, and F. Sains Dan Teknologi, “Kendali Kecepatan Motor DC Untuk Kendaraan Roda Dua Dengan PWM,” 2024.
- [17] Muhammad Azmi Aulia Amin, Tedy Rismawan, and Irma Nirmala, “Sistem Penyiraman Tanaman Otomatis Untuk Pertanian Tanaman

- Tomat Menggunakan Metode Pulse Width Modulation (PWM),” vol. 12, 2024.
- [18] Agilent Technologies, “Digital Multimeter Measurement Errors Series AC Voltage Measurement Errors in Digital Multimeters,” USA, Jan. 2002.
 - [19] Y. Peng *et al.*, “Highly precise and efficient powder feeding system based on gravimetric feedback,” *Powder Technol.*, vol. 354, pp. 719–726, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2019.06.043.
 - [20] F. Baskoro *et al.*, “Optimizing Stability of Ultrasonic Sensor Readings: Study on Moving Average Filter Parameter Selection,” 2025.
 - [21] S. T. Subandi, M. A. Novianta, and D. F. Athallah, “RANCANG BANGUN PEMBATAAN PEMAKAIAN AIR MINUM BERBASIS ARDUINO MEGA 2560 PRO MINI DENGAN SENSOR WATER FLOW YF-S204,” 2021.
 - [22] A. Roihan, E. Sunandar, and M. A. A. Fatah, “Purwarupa RFID Student Smart Card Berbasis Raspberry pada Sekolah Menengah Kejuruan GT,” *EXPERT: Jurnal Manajemen Sistem Informasi dan Teknologi*, vol. 12, no. 1, p. 16, Jun. 2022, doi: 10.36448/expert.v12i1.2526.
 - [23] J. W. Jolles, “Broad-scale applications of the Raspberry Pi: A review and guide for biologists,” Sep. 01, 2021, *British Ecological Society*. doi: 10.1111/2041-210X.13652.
 - [24] H. Kim, H. Lee, S. Ahn, W. K. Jung, and S. H. Ahn, “Broken stitch detection system for industrial sewing machines using HSV color space and image processing techniques,” *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 10, no. 4, pp. 1602–1614, Aug. 2023, doi: 10.1093/jcde/qwad069.
 - [25] M. Rusli and B. Siswojo, “A fuzzy-PID based control approach for precision volume filling in nitroglycerin production Sa’id A’inul Yaqin,” *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering-Jurnal Polimesin*, vol. 23, no. 4, 2025, [Online]. Available: <http://e-jurnal.pnl.ac.id/polimesin>
 - [26] Ltd. Kamoer Fluid Tech (Shanghai) Co., “Kamoer NKP-DC-S10B Peristaltic Dosing Pump User Manual.”
 - [27] Soldered Electronics, “Load Cell Sensor 10kg Datasheet.” [Online]. Available: www.solde.red/100384

- [28] GNS Components Limited, “Modul AD Presisi 24-bit Untuk Load Cell HX711.”
- [29] Ltd. , Avia Semiconductor Co., “HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales,” Available: HX711 datasheet PDF.
- [30] Step, “Committee for Medicinal Products for Human Use ICH Q2(R2) Guideline on validation of analytical procedures,” 2023. [Online]. Available: www.ema.europa.eu/contact
- [31] B. R. Hubbard and J. M. Pearce, “Open-source digitally replicable lab-grade scales,” *Instruments*, vol. 4, no. 3, Sep. 2020, doi: 10.3390/instruments4030018.
- [32] D. Esposito, J. Centracchio, E. Andreozzi, P. Bifulco, and G. D. Gargiulo, “Design and Evaluation of a Low-Cost Electromechanical System to Test Dynamic Performance of Force Sensors at Low Frequencies,” *Machines*, vol. 10, no. 11, 2022, doi: 10.3390/machines10111017.
- [33] W. L. Cheng, C. Markus, C. Y. Lim, R. Z. Tan, S. K. Sethi, and T. P. Loh, “Calibration Practices in Clinical Mass Spectrometry: Review and Recommendations,” Jan. 01, 2023, *Seoul National University, Institute for Cognitive Science*. doi: 10.3343/alm.2023.43.1.5.
- [34] Akhishop Electronics, “555 High Torque Planetary Geared Motor DC 12V,” 2026.
- [35] S. Gilang Samudra, O. Haris, P. K. Digital Boash Indonesia Jl Letkol Atang Senjaya, K. Bantarsari, and K. Bogor, “Jurnal Mema (Jurnal Mesin dan Manufaktur) Analisa Tegangan dan Safety Factor Pada Design Poros Mesin Crusher Untuk HDPE Kapasitas 0.2646 Kg/min,” vol. 2, no. 1, pp. 43–52, 2025, [Online]. Available: <https://memajournal.indiepress.id/index.php/mema/index>
- [36] V. N. Van Harling and H. Apasi, “PERANCANGAN POROS DAN BEARING PADA MESIN PERAJANG SINGKONG,” no. 2, 2018.
- [37] A. Alfiansyah, I. Komang Somawirata, M. I. Ashari, T. Elektro, I. Malang, and M. Indonesia, “PERANCANGAN SISTEM CHARGING UNTUK KURSI RODA ELEKTRIK DENGAN MEMANFAATKAN ENERGI MATAHARI UNTUK PENGISIAN DAYA,” *Magnetika*, vol. 8, pp. 360–373, 2024.

- [38] T. Suhendra *et al.*, “Kendali Kecepatan Motor DC dengan Metode Pulse Width Modulation menggunakan N-channel Mosfet,” vol. 07, no. 02, pp. 78–85, 2018.
- [39] HEXFET® Power MOSFET, “IRLZ44NPbF,” 2003.
- [40] Subono, A. Hidayat, V. A. Wardhany, I. N. Syamsiana, G. S. Prayogo, and N. A. Agustina, “Doppler Ultrasound Sense Performance for Cardiotography (CTG) Fetal Baby Heartbeat Detector Using Arduino Mega Pro Mini,” in *Proceeding - 6th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering: Applying Data Sciences and Artificial Intelligence Technologies for Environmental Sustainability, ICITISEE 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 777–780. doi: 10.1109/ICITISEE57756.2022.10057788.
- [41] CNC Store Bandung, “LCD Display Module 3.6 Inch TFT Touch Screen – Layar Sentuh untuk Arduino UNO R3 & Mega 2560.” Accessed: Mar. 01, 2026. [Online]. Available: <https://cncstorebandung.com/product/lcd-display-module-3-6-inch-tft-touch-screen-for-uno-r3-mega2560/>
- [42] I. Suwarno, F. Alhakim, P. Megantoro, and S. D. Perkasa, “Design and Metrological Analysis of An Automatic Air Pressure Measurement Instrument Using Arduino Mega 2560,” in *2023 6th International Conference on Information and Communications Technology, ICOIACT 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 5–10. doi: 10.1109/ICOIACT59844.2023.10455925.
- [43] H. P. Nurba, Y. Fauzi, A. G. Djatnika, and K. A. Munastha, “IMPLEMENTASI PANEL SURYA UNTUK PERANGKAT BATERAI PORTABEL,” *Infotronik : Jurnal Teknologi Informasi dan Elektronika*, vol. 7, no. 2, p. 110, Dec. 2022, doi: 10.32897/infotronik.2022.7.2.2259.
- [44] U. K. Firman Daus, “SECURITY SEPEDA MOTOR BERBASIS ANDROID,” 2021.
- [45] Arfian Eka Wardana, “PENERAPAN POWER SUPPLY SEBAGAI PENGANTI BATERAI ATAU ACCU PADA MEDIA PEMBELAJARAN TRAINER KELISTRIKAN BODI KENDARAAN RINGAN PADA SMK ISLAM 2 DURENAN TRENGGALEK 2024,” *Journal of Automotive Vocational Education (JAVED)*, vol. 1, 2024.

- [46] M. Febriansyah, “SISTEM KONTROL MESIN AUTOMATIC COOKER CANDY MENGGUNAKAN PLC OMRON CJ1M DAN HMI WEINVIEW MT6070IH,” vol. 25, Jul. 2023.
- [47] F. Marinus, B. Yulianti, and D. M. Haryanti, “RANCANG BANGUN SISTEM PENYIRAMAN TANAMAN BERDASARKAN WAKTU MENGGUNAKAN RTC BERBASIS ARDUINO UNO PADA TANAMAN TOMAT,” 2024.
- [48] A, T. Rahajoeningroem, and H. Vilandika, “Rancang Bangun Alat Pengisi Baterai Telepon Genggam Memanfaatkan Sinyal Radio Frekuensi,” 2017.
- [49] G. Febriyani Pratiwi and S. Ilman, “PROTOTIPE INVERTER 12VDC TO 220VAC 200W UNTUK MENGHIDUPKAN BEBAN (LAMPU ATAU KIPAS ANGIN) SAAT TERJADI PEMADAMAN LISTRIK PLN,” pp. 63–72, 2022, [Online]. Available: <http://jurnal.undira.ac.id/index.php/jurnaltera/>
- [50] T. Arifianto *et al.*, “APLIKASI PERHITUNGAN RESISTANSI RESISTOR MENGGUNAKAN AUGMENTED REALITY Resistor Resistance Calculation Applications Using Augmented Reality,” *Jurnal Ilmiah Intech : Information Technology Journal of UMUS*, vol. 5, no. 2, pp. 130–142, 2023.
- [51] S. Firmansyah, D. Lelono, and R. Sumiharto, “Analysis of Resistor Color Differences Against Resistance Values,” *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems)*, vol. 5, no. 1, p. 1, May 2015, doi: 10.22146/ijeis.7148.
- [52] I. Setiono and D. Prasetyo, *SISTEM PENGAMANAN PENYALURAN ENERGI LISTRIK SATU FASA TEGANGAN RENDAH DENGAN MENGGUNAKAN FUSE CUT OUT*. 2016.
- [53] Dickson Kho, “Pengertian dan Fungsi Fuse (Sekering) serta Cara Mengukurnya,” *Komponen Elektronika*.
- [54] C. E. Wicaksono, A. Lomi, and A. U. Krismanto, “Analisa Unjuk Kerja Maximum Power Point Tracker (MPPT) Berbasis Arduino Dengan Algoritma Peturb And Observe (P&O) Serta Fuzzy Logic,” vol. 1, pp. 25–5, 2024.

- [55] S. A. Putra, A. Rozaq, S. Pd, and P. Lain, “ALAT PENDETEKSI KERUSAKAN PENGAPIAN PADA SEPEDA MOTOR CDI-DC BERBASIS ARDUINO,” *Jurnal ELKON*, vol. 5, no. 1, pp. 2809–140, 2025.
- [56] Intel Corporation., “ATX Version 3.0 Multi Rail Desktop Platform Power Supply Design Guide,” 2023.
- [57] Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, “TLP250,” Jun. 2019.
- [58] T. Suhendra *et al.*, “Kendali Kecepatan Motor DC dengan Metode Pulse Width Modulation menggunakan N-channel Mosfet,” vol. 07, no. 02, pp. 78–85, 2018.
- [59] M. Sulaiman, “ANALISA TRANSISTOR BJT BERBASIS SIMULASI MENGGUNAKAN APLIKASI PROTEUS SEBAGAI MEDIA PENUNJANG PEMBELAJARAN,” vol. 2, no. 12, 2023.
- [60] Y. E. Prasetyo and F. Rohman, “ANALISIS PERBANDINGAN KINERJA H-BRIDGE DRIVER MENGGUNAKAN IGBT DAN MOSFET PADA SISTEM KEMUDI STEER BY WIRE,” vol. 3, pp. 73–80, Mar. 2018.
- [61] A. Hidayanto and H. Winarno, “PROTOTIPE SISTEM AUTOBRAKE PADA MOBIL MENGGUNAKAN SENSOR JARAK ULTRASONIK HC-SR04 BERBASIS ARDUINO MEGA 2560,” 2015.
- [62] Badan Standardisasi Nasional, “SNI 3564:2009 Cat Tembok Emulsi,” Jakarta, 2009.
- [63] D. P. D. F. Cahyadi, “Pengembangan Formulasi Cat Tembok Emulsi Berbahan Acrylic untuk Meningkatkan Daya Saing IKM,” *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik*, vol. 4, 2014.

LAMPIRAN

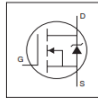
1. Datasheet Komponen

IRLZ44N

International
Rectifier

PD - 94831

IRLZ44NPbF
HEXFET® Power MOSFET



$V_{DS} = 55V$
 $R_{DS(on)} = 0.022\Omega$
 $I_D = 47A$



- Logic-Level Gate Drive
- Advanced Process Technology
- Dynamic dV/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated
- Lead-Free Description

Description
Fifth Generation HEXFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve the lowest possible on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Max.	Units
I_D @ $T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{DS} @ 10V$	47
I_D @ $T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{DS} @ 10V$	33
I_{AS}	Pulsed Drain Current $\dagger$	160
P_D @ $T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	110
	Linear Derating Factor	0.71
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	±18
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy $\ddagger$	210
I_{AS}	Avalanche Current $\ddagger$	25
E_{RS}	Repetitive Avalanche Energy $\ddagger$	11
dI/dt	Peak Switching Recovery $\ddagger$	5.0
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175
t_{SD}	Soldering Temperature for 10 seconds	300 (1.6mm from case)
	Mounting time, 0.5/2 or 100 sec	10 (pins 1-14mm)

Thermal Resistance

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
R_{JA}	Junction-to-Air	—	1.4	$^\circ C/W$
R_{JC}	Case-to-Sink, Flat, Gassed Surface	0.50	—	$^\circ C/W$
R_{SA}	Junction-to-Ambient	—	62	$^\circ C/W$

11/1/03

TLP250

SEMICONDUCTOR
TOSHIBA
TECHNICAL DATA

TLP250

01F08

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Ta = 25°C)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING	UNIT
Forward Current	I_F	20	mA
Forward Current Derating (Ta ≥ 70°C)	dI_F/dT_A	-0.56	mA/°C
Peak Transient Forward Current (Note 1)	I_{FPT}	1	A
Reverse Voltage	V_R	6	V
Junction Temperature	T_J	125	°C
"HI" Peak Output Current (Pkg ≤ 2.5mm, F = 10kHz/Note 2)	I_{OHI}	±1.5	A
"LT" Peak Output Current (Pkg ≤ 2.5mm, F = 10kHz/Note 2)	I_{OLP}	±1.5	A
Output Voltage (Ta ≤ 70°C)	V_O	26	V
Supply Voltage (Ta ≤ 70°C)	V_{CC}	24	V
Output Voltage Derating (Ta ≥ 70°C)	dV_O/dT_A	-0.73	V/°C
Supply Voltage Derating (Ta ≥ 70°C)	dV_{CC}/dT_A	-0.73	V/°C
Junction Temperature	T_J	125	°C
Operating Frequency (Note 3)	f	26	kHz
Operating Temperature Range	T_{op}	-55 to +70	°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	-55 to +125	°C
Lead Solder Temperature (10s)	T_{sl}	260	°C
Isolation Voltage (AC, 1min., EHL ≤ 60%, Ta = 25°C) (Note 4)	BV_g	2000	Vrms

Note 1 : Pulse width $P_g \leq 1ms$, 500pps

Note 2 : Exponential Waveform

Note 3 : Exponential Waveform, $I_{OHI} \leq -1.0A$ ($\leq 2.5ms$), $I_{OLP} \leq +1.0A$ ($\leq 2.5ms$)

Note 4 : Device considered a two terminal device : pins 1,2,3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

Note 5 : A ceramic capacitor (0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. The total lead length between opamp and coupler should not exceed 1cm.

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Input Current, ON	$I_F(ON)$	7	8	20	mA
Input Voltage, OFF	$V_F(OFF)$	0	—	0.8	V
Supply Voltage	V_{CC}	15	—	30	V
Peak Output Current	I_{OHI}/I_{OLP}	—	—	±0.5	A
Operating Temperature	T_{op}	-55	25	70	°C

NKP-DC-S10B

TLP250

SEMICONDUCTOR
TOSHIBA
TECHNICAL DATA

TOSHIBA PHOTOCOUPLER
TLP250
GALVANIC ISOLATED PHOTO-C

TRANSISTOR INVERTER
INVERTER FOR AIR CONDITIONER
HEAT GATE DRIVE
PUSH AND UP GATE DRIVE

The Toshiba TLP250 consists of a GaAs light emitting diode and a long-lived photodiode.
This unit is a dual DIP package.
TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOSFET.

- Input Threshold Current : $I_F = 1mA$ (Max.)
- Supply Current I_{CC} : 1.5mA (Max.)
- Supply Voltage V_{CC} : 10-30V
- Output Current I_O : 0.5A (Max.)
- Switching Time t_{sw} (AHL) : 0.5μs (Max.)
- Isolation Voltage : 2000Vrms (Min.)
- CL Tempco : CL1597, Pin No. 3075049
- Output Features : 1. Output Current : 0.5A (Max.)
- Output Voltage : 10-30V (Max.)
- Maximum Operating Junction Voltage : 100V (Max.)
- Maximum Permissible Power : 0.5W (Max.)

(TLP250) When a VDDHBA approval type is needed, please designate the Typ. (Min.)

- Dimensions : 1.5mm (Min.)
- Dimensions : 6mm (Min.)

SCHEMATIC

1. Input

2. Output

3. Input

4. Output

5. Input

6. Output

7. Input

8. Output

9. Input

10. Output

11. Input

12. Output

13. Input

14. Output

15. Input

16. Output

17. Input

18. Output

19. Input

20. Output

21. Input

22. Output

23. Input

24. Output

25. Input

26. Output

27. Input

28. Output

29. Input

30. Output

31. Input

32. Output

33. Input

34. Output

35. Input

36. Output

37. Input

38. Output

39. Input

40. Output

41. Input

42. Output

43. Input

44. Output

45. Input

46. Output

47. Input

48. Output

49. Input

50. Output

51. Input

52. Output

53. Input

54. Output

55. Input

56. Output

57. Input

58. Output

59. Input

60. Output

61. Input

62. Output

63. Input

64. Output

65. Input

66. Output

67. Input

68. Output

69. Input

70. Output

71. Input

72. Output

73. Input

74. Output

75. Input

76. Output

77. Input

78. Output

79. Input

80. Output

81. Input

82. Output

83. Input

84. Output

Unit is mm

1. Input

2. Output

3. Input

4. Output

5. Input

6. Output

7. Input

8. Output

9. Input

10. Output

11. Input

12. Output

13. Input

14. Output

15. Input

16. Output

17. Input

18. Output

19. Input

20. Output

21. Input

22. Output

23. Input

24. Output

25. Input

26. Output

27. Input

28. Output

29. Input

30. Output

31. Input

32. Output

33. Input

34. Output

35. Input

36. Output

37. Input

38. Output

39. Input

40. Output

41. Input

42. Output

43. Input

44. Output

45. Input

46. Output

47. Input

48. Output

49. Input

50. Output

51. Input

52. Output

53. Input

54. Output

55. Input

56. Output

57. Input

58. Output

59. Input

60. Output

61. Input

62. Output

63. Input

64. Output

65. Input

66. Output

67. Input

68. Output

69. Input

70. Output

71. Input

72. Output

73. Input

74. Output

75. Input

76. Output

77. Input

78. Output

79. Input

80. Output

81. Input

82. Output

83. Input

84. Output

85. Input

86. Output

87. Input

88. Output

89. Input

90. Output

91. Input

92. Output

93. Input

94. Output

95. Input

96. Output

97. Input

98. Output

99. Input

100. Output

101. Input

102. Output

103. Input

104. Output

105. Input

106. Output

Specification	Value
Model	NKP-DC-510B
Voltage	12V DC
Current	0.25A
Flow Rate	5.2 ~ 90 ml/min
Pump Tube Type	Silica gel tube
Pump Tube Size	3mm ID x 5mm OD
Relative Humidity	<80%
Ambient Temperature	<80°C
Material	Plastic
Product Dimensions (L x W x H)	2.63" x 2.16" x 1.61" (67mm x 55mm x 41mm)
Item Weight	3.88 ounces (0.24 lbs)
Maximum Power	5 Watts
Sound Level	40 dB
Mounting Type	Embedded

JOY-IT

10 KG LOAD CELL

with amplifier board



MAIN FEATURES	
Model	HK711-10
Special feature	Integrated 24 bit A/D-converter
Measuring range	Up to 10 kg
Load cell accuracy	±0.02% F.S
Items delivered	Load cell, amplifier board, pin header (4 pins)

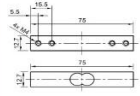
With this load cell and amplifier board, you can build your own scale in conjunction with a microcontroller or single-board computer.

The amplifier board contains an HK711 24 bit A/D converter to convert the analogue signal of the load cell into a weight with high accuracy.

Due to its high popularity, there are many application examples online for this converter.

FURTHER SPECIFICATIONS	
Supply voltage	2.6 ~ 5.25 V
Current consumption	~ 1.5 mA
Interface	Serial 3 wire
Dimensions PCB	34.2 x 20 x 3 mm
Dimensions load cell	75 x 15 x 14.2 mm
Cable length	25 cm
Weight	33.5 g

FURTHER DETAILS	
Article No.	SEN-HK711-10
EAN	4250236822280
Customs Tariff No.	84239010



MADE IN CHINA

JOY-IT GmbH
SMAU Electronics GmbH
Postfach 81 47010 Bonn-Königsberg

2. Hasil Debit Pompa

• Biru 120, 150, 180, 210, 255

Hasil PWM 120 Percobaan 1 = 11.74 g Percobaan 2 = 12.46 g Percobaan 3 = 12.55 g Massa Rata-rata = 12.25 g Debit = 1.22 g/s	Hasil PWM 150 Percobaan 1 = 14.40 g Percobaan 2 = 14.85 g Percobaan 3 = 15.17 g Massa Rata-rata = 14.81 g Debit = 1.48 g/s	Hasil PWM 180 Percobaan 1 = 17.34 g Percobaan 2 = 17.38 g Percobaan 3 = 17.46 g Massa Rata-rata = 17.39 g Debit = 1.74 g/s
Hasil PWM 210 Percobaan 1 = 18.74 g Percobaan 2 = 18.88 g Percobaan 3 = 18.44 g Massa Rata-rata = 18.69 g Debit = 1.87 g/s	Hasil PWM 255 Percobaan 1 = 20.91 g Percobaan 2 = 21.13 g Percobaan 3 = 20.77 g Massa Rata-rata = 20.94 g Debit = 2.09 g/s	

• Hitam 120, 150, 180, 210, 255

-> HASIL PWM 120 -> WARNA : HITAM -> Percobaan 1 = 9.33 g -> Percobaan 2 = 9.43 g -> Percobaan 3 = 9.45 g -> Massa Rata-rata = 9.40 g -> Debit = 0.94 g/s	HASIL PWM 150 WARNA : HITAM Percobaan 1 = 11.37 g Percobaan 2 = 11.94 g Percobaan 3 = 11.95 g Massa Rata-rata = 11.75 g Debit = 1.18 g/s	HASIL PWM 180 WARNA : HITAM Percobaan 1 = 13.58 g Percobaan 2 = 13.66 g Percobaan 3 = 13.96 g Massa Rata-rata = 13.73 g Debit = 1.37 g/s
HASIL PWM 210 WARNA : HITAM Percobaan 1 = 15.02 g Percobaan 2 = 14.91 g Percobaan 3 = 15.09 g Massa Rata-rata = 15.01 g Debit = 1.50 g/s	HASIL PWM 255 WARNA : HITAM Percobaan 1 = 16.27 g Percobaan 2 = 16.21 g Percobaan 3 = 16.54 g Massa Rata-rata = 16.34 g Debit = 1.63 g/s	

• Kuning 120, 150, 180, 210, 255

HASIL PWM 120 WARNA : KUNING Percobaan 1 = 8.02 g Percobaan 2 = 7.81 g Percobaan 3 = 7.91 g Massa Rata-rata = 7.91 g Debit = 0.79 g/s	HASIL PWM 150 WARNA : KUNING Percobaan 1 = 10.29 g Percobaan 2 = 10.33 g Percobaan 3 = 10.11 g Massa Rata-rata = 10.24 g Debit = 1.02 g/s	HASIL PWM 180 WARNA : KUNING Percobaan 1 = 10.50 g Percobaan 2 = 12.05 g Percobaan 3 = 11.81 g Massa Rata-rata = 11.45 g Debit = 1.15 g/s
HASIL PWM 210 WARNA : KUNING Percobaan 1 = 13.62 g Percobaan 2 = 13.69 g Percobaan 3 = 13.63 g Massa Rata-rata = 13.65 g Debit = 1.36 g/s	HASIL PWM 255 WARNA : KUNING Percobaan 1 = 16.89 g Percobaan 2 = 16.91 g Percobaan 3 = 16.98 g Massa Rata-rata = 16.93 g Debit = 1.69 g/s	

• Putih 120, 150, 180, 210, 255

HASIL PWM 120 WARNA : PUTIH Percobaan 1 = 7.15 g Percobaan 2 = 7.22 g Percobaan 3 = 7.11 g Massa Rata-rata = 7.16 g Debit = 0.72 g/s	HASIL PWM 150 WARNA : PUTIH Percobaan 1 = 8.97 g Percobaan 2 = 8.95 g Percobaan 3 = 8.25 g Massa Rata-rata = 8.72 g Debit = 0.87 g/s	HASIL PWM 180 WARNA : PUTIH Percobaan 1 = 9.39 g Percobaan 2 = 9.84 g Percobaan 3 = 9.98 g Massa Rata-rata = 9.74 g Debit = 0.97 g/s
HASIL PWM 210 WARNA : PUTIH Percobaan 1 = 11.00 g Percobaan 2 = 11.28 g Percobaan 3 = 11.68 g Massa Rata-rata = 11.32 g Debit = 1.13 g/s	HASIL PWM 255 WARNA : PUTIH Percobaan 1 = 13.01 g Percobaan 2 = 13.06 g Percobaan 3 = 12.92 g Massa Rata-rata = 13.00 g Debit = 1.30 g/s	

• Merah 120, 150, 180, 210, 255

HASIL PWM 120 WARNA : MERAH Percobaan 1 = 9.55 g Percobaan 2 = 9.60 g Percobaan 3 = 9.84 g Massa Rata-rata = 9.66 g Debit = 0.97 g/s	HASIL PWM 150 WARNA : MERAH Percobaan 1 = 12.65 g Percobaan 2 = 12.52 g Percobaan 3 = 12.47 g Massa Rata-rata = 12.55 g Debit = 1.25 g/s	HASIL PWM 180 WARNA : MERAH Percobaan 1 = 14.57 g Percobaan 2 = 14.40 g Percobaan 3 = 14.25 g Massa Rata-rata = 14.41 g Debit = 1.44 g/s
HASIL PWM 210 WARNA : MERAH Percobaan 1 = 16.17 g Percobaan 2 = 16.14 g Percobaan 3 = 16.06 g Massa Rata-rata = 16.12 g Debit = 1.61 g/s	HASIL PWM 255 WARNA : MERAH Percobaan 1 = 18.94 g Percobaan 2 = 18.80 g Percobaan 3 = 18.55 g Massa Rata-rata = 18.76 g Debit = 1.88 g/s	

Hasil Overshoot Dan Batas Stop

REKAP OVERSHOOT PWM 255 TARGET 50 g	
Overshoot PWM 255 - 1	= 0.86 g
Overshoot PWM 255 - 2	= 0.85 g
Overshoot PWM 255 - 3	= 0.84 g
Overshoot Rata-rata PWM 255 = 0.85 g	
REKAP OVERSHOOT PWM 120 TARGET 50 g	
Overshoot PWM 120 - 1	= 0.70 g
Overshoot PWM 120 - 2	= 0.49 g
Overshoot PWM 120 - 3	= 0.39 g
Overshoot Rata-rata PWM 120 = 0.53 g	
PARAMETER TWO-STAGE DOSING	
PWM Cepat	= 255
PWM Lambat	= 120
Overshoot Avg PWM 255	= 0.85 g
Overshoot Avg PWM 120	= 0.53 g
Stop PWM 255 Target 50 g	= 50.00 - 0.85 = 49.15 g
Stop PWM 120 Target 50 g	= 50.00 - 0.53 = 49.47 g
Stop Akhir jika Target 50 g memakai PWM 120 = 50.00 - 0.53 = 49.47 g	
(Gunakan overshoot PWM 120 untuk stop akhir two-stage dosing)	

Hasil Overshoot Biru

REKAP OVERSHOOT PWM 255 TARGET 50 g	
Overshoot PWM 255 - 1	= 1.15 g
Overshoot PWM 255 - 2	= 0.93 g
Overshoot PWM 255 - 3	= 1.28 g
Overshoot Rata-rata PWM 255 = 1.12 g	
REKAP OVERSHOOT PWM 120 TARGET 50 g	
Overshoot PWM 120 - 1	= 0.60 g
Overshoot PWM 120 - 2	= 0.76 g
Overshoot PWM 120 - 3	= 0.88 g
Overshoot Rata-rata PWM 120 = 0.75 g	
PARAMETER TWO-STAGE DOSING	
PWM Cepat	= 255
PWM Lambat	= 120
Overshoot Avg PWM 255	= 1.12 g
Overshoot Avg PWM 120	= 0.75 g
Stop PWM 255 Target 50 g	= 50.00 - 1.12 = 48.88 g
Stop PWM 120 Target 50 g	= 50.00 - 0.75 = 49.25 g
Stop Akhir jika Target 50 g memakai PWM 120 = 50.00 - 0.75 = 49.25 g	
(Gunakan overshoot PWM 120 untuk stop akhir two-stage dosing)	

Hasil Overshoot Hitam

REKAP OVERSHOOT PWM 255 TARGET 50 g	
Overshoot PWM 255 - 1	= 1.75 g
Overshoot PWM 255 - 2	= 1.88 g
Overshoot PWM 255 - 3	= 1.53 g
Overshoot Rata-rata PWM 255 = 1.72 g	
REKAP OVERSHOOT PWM 120 TARGET 50 g	
Overshoot PWM 120 - 1	= 0.81 g
Overshoot PWM 120 - 2	= 1.07 g
Overshoot PWM 120 - 3	= 0.87 g
Overshoot Rata-rata PWM 120 = 0.92 g	
PARAMETER TWO-STAGE DOSING	
PWM Cepat	= 255
PWM Lambat	= 120
Overshoot Avg PWM 255	= 1.72 g
Overshoot Avg PWM 120	= 0.92 g
Stop PWM 255 Target 50 g	= 50.00 - 1.72 = 48.28 g
Stop PWM 120 Target 50 g	= 50.00 - 0.92 = 49.08 g
Stop Akhir jika Target 50 g memakai PWM 120 = 50.00 - 0.92 = 49.08 g	
(Gunakan overshoot PWM 120 untuk stop akhir two-stage dosing)	

Hasil Overshoot Kuning

REKAP OVERSHOOT PWM 255 TARGET 50 g	
Overshoot PWM 255 - 1	= 1.07 g
Overshoot PWM 255 - 2	= 0.89 g
Overshoot PWM 255 - 3	= 0.87 g
Overshoot Rata-rata PWM 255 = 0.94 g	
REKAP OVERSHOOT PWM 120 TARGET 50 g	
Overshoot PWM 120 - 1	= 0.65 g
Overshoot PWM 120 - 2	= 0.58 g
Overshoot PWM 120 - 3	= 0.55 g
Overshoot Rata-rata PWM 120 = 0.59 g	
PARAMETER TWO-STAGE DOSING	
PWM Cepat	= 255
PWM Lambat	= 120
Overshoot Avg PWM 255	= 0.94 g
Overshoot Avg PWM 120	= 0.59 g
Stop PWM 255 Target 50 g	= 50.00 - 0.94 = 49.06 g
Stop PWM 120 Target 50 g	= 50.00 - 0.59 = 49.41 g
Stop Akhir jika Target 50 g memakai PWM 120 = 50.00 - 0.59 = 49.41 g	
(Gunakan overshoot PWM 120 untuk stop akhir two-stage dosing)	

Hasil Overshoot Putih

REKAP OVERSHOOT PWM 255 TARGET 50 g	
Overshoot PWM 255 - 1	= 0.80 g
Overshoot PWM 255 - 2	= 0.82 g
Overshoot PWM 255 - 3	= 0.88 g
Overshoot Rata-rata PWM 255 = 0.83 g	
REKAP OVERSHOOT PWM 120 TARGET 50 g	
Overshoot PWM 120 - 1	= 0.27 g
Overshoot PWM 120 - 2	= 0.47 g
Overshoot PWM 120 - 3	= 0.50 g
Overshoot Rata-rata PWM 120 = 0.41 g	
PARAMETER TWO-STAGE DOSING	
PWM Cepat	= 255
PWM Lambat	= 120
Overshoot Avg PWM 255	= 0.83 g
Overshoot Avg PWM 120	= 0.41 g
Stop PWM 255 Target 50 g	= 50.00 - 0.83 = 49.17 g
Stop PWM 120 Target 50 g	= 50.00 - 0.41 = 49.59 g
Stop Akhir jika Target 50 g memakai PWM 120 = 50.00 - 0.41 = 49.59 g	
(Gunakan overshoot PWM 120 untuk stop akhir two-stage dosing)	

Hasil Overshoot Merah

3. Hasil Mementukan t_{Delay} Dan $\Delta m_{Threshold}$

```

REKAP 3 PERCOBAAN t_DELAY
-----
Trial | t_delay (s) | Delta aktual (g) | Delta rumus (g)
-----
1 | 0.800 | 1.024 | 1.672
2 | 0.800 | 1.156 | 1.672
3 | 1.100 | 1.723 | 2.299
-----
Rata-rata t_delay = 0.900 s
Rata-rata Delta aktual = 1.301 g
Rata-rata Delta rumus = 1.881 g

PARAMETER HASIL TES PERTAMA
Delta m threshold = 1.881 g
Batas switch target 50 = 50.000 - 1.881 = 48.119 g
Batas stop PWM 120 = 50.000 - 0.530 = 49.470 g
=====

```

Hasil Biru

```

REKAP 3 PERCOBAAN t_DELAY
=====
Trial | t_delay (s) | Delta aktual (g) | Delta rumus (g)
-----
1 | 1.300 | 1.783 | 2.119
2 | 1.400 | 1.899 | 2.282
3 | 1.300 | 1.752 | 2.119
=====
Rata-rata t_delay = 1.333 s
Rata-rata Delta aktual = 1.811 g
Rata-rata Delta rumus = 2.173 g
=====
PARAMETER HASIL TES PERTAMA
Delta m threshold = 2.173 g
Batas switch target 50 = 50.000 - 2.173 = 47.827 g
Batas stop PWM 120 = 50.000 - 0.750 = 49.250 g

```

Hasil Kuning

```

REKAP 3 PERCOBAAN t_DELAY
=====
Trial | t_delay (s) | Delta aktual (g) | Delta rumus (g)
-----
1 | 1.100 | 1.355 | 2.068
2 | 1.200 | 1.523 | 2.256
3 | 1.300 | 1.666 | 2.444
-----
Rata-rata t_delay = 1.200 s
Rata-rata Delta aktual = 1.514 g
Rata-rata Delta rumus = 2.256 g

PARAMETER HASIL TES PERTAMA
Delta m threshold = 2.256 g
Batas switch target 50 = 50.000 - 2.256 = 47.744 g
Batas stop PWM 120 = 50.000 - 0.410 = 49.590 g

```

Hasil Merah

4. Validasi parameter beban 50g

```
=====
REKAP VALIDASI GRAVIMETRIC TWO-STAGE DOSING
=====
Pompa           : BIRU
Jumlah data valid : 3 dari 3

Trial | Massa Aktual | Error g | Error % | Sisa Aliran | Waktu Total | Status
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
1      | 50.060 g      | 0.060   | 0.120   | 1.151 g      | 26.414 s     | SESUAI
2      | 50.123 g      | 0.060   | 0.120   | 1.052 g      | 26.138 s     | SESUAI
3      | 50.052 g      | 0.052   | 0.103   | 1.176 g      | 25.864 s     | SESUAI
=====

STATISTIK HASIL
Target massa           = 50.000 g
Rata-rata massa aktual = 50.078 g
Massa minimum          = 50.052 g
Massa maksimum         = 50.123 g
Standar deviasi sampel = 0.039 g
Coefficient of variation = 0.077 %
Persentase rentang RR  = 0.142 %
Rata-rata error berranda = 0.078 g
Mean absolute error     = 0.078 g
Root mean square error  = 0.084 g
Rata-rata error persen  = 0.156 %
Rata-rata sisa aliran   = 1.136 g
Rata-rata massa switch  = 48.132 g
Rata-rata massa OFF     = 48.519 g
Rata-rata waktu presisi = 0.427 s
Rata-rata waktu total   = 26.139 s
Jumlah hasil sesuai     = 3 dari 3
```

Validasi Biru

```
=====
REKAP 3 PERCOBAAN t_DELAY
=====
Trial | t_delay (s) | Delta aktual (g) | Delta rumus (g)
-----
1 | 1.300 | 1.783 | 2.119
2 | 1.400 | 1.899 | 2.282
3 | 1.300 | 1.752 | 2.119
-----
Rata-rata t_delay = 1.333 s
Rata-rata Delta aktual = 1.811 g
Rata-rata Delta rumus = 2.173 g

=====
PARAMETER HASIL TES PERTAMA
Delta m threshold = 2.173 g
Batas switch target 50 = 50.000 - 2.173 = 47.827 g
Batas stop FWM 120 = 50.000 - 0.750 = 49.250 g
=====
```

Hasil Hitam

```

REKAP 3 PERCOBAAN t_DELAY
=====
Trial | t_delay (s) | Delta aktual (g) | Delta rumus (g)
-----
1 | 1.200 | 1.335 | 1.560
2 | 1.300 | 1.374 | 1.690
3 | 1.400 | 1.376 | 1.820
-----
Rata-rata t_delay = 1.300 s
Rata-rata Delta aktual = 1.362 g
Rata-rata Delta rumus = 1.690 g
=====

PARAMETER HASIL TES PERTAMA
Delta m threshold = 1.690 g
Batas switch target 50 = 50.000 - 1.690 = 48.310 g
Batas stop PWM 120 = 50.000 - 0.590 = 49.410 g

```

Hasil Putih

Validasi Hitam

REKAP VALIDASI GRAVIMETRIC TWO-STAGE DOSING							REKAP VALIDASI GRAVIMETRIC TWO-STAGE DOSING						
Pompa : KUNING							Pompa : PUTIH						
Jumlah data valid : 3 dari 3							Jumlah data valid : 3 dari 3						
Trial	Massa Aktual	Error g	Error %	Sisa Aliran	Waktu Total	Status	Trial	Massa Aktual	Error g	Error %	Sisa Aliran	Waktu Total	Status
1	50.066 g	0.066	0.133	0.940 g	28.344 s	SESUAI	1	50.288 g	0.288	0.576	0.823 g	50.231 s	SESUAI
2	50.071 g	0.071	0.142	0.874 g	28.246 s	SESUAI	2	49.990 g	-0.010	0.020	0.524 g	51.790 s	SESUAI
3	50.189 g	0.189	0.379	1.010 g	29.074 s	SESUAI	3	50.129 g	0.129	0.258	0.691 g	50.049 s	SESUAI
STATISTIK HASIL							STATISTIK HASIL						
Target massa		= 50.000 g					Target massa		= 50.000 g				
Rata-rata massa aktual		= 50.109 g					Rata-rata massa aktual		= 50.136 g				
Massa minimum		= 50.066 g					Massa minimum		= 49.990 g				
Massa maksimum		= 50.189 g					Massa maksimum		= 50.288 g				
Standar deviasi sampel		= 0.070 g					Standar deviasi sampel		= 0.149 g				
Coefficient of variation		= 0.139 %					Coefficient of variation		= 0.297 %				
Persentase rentang RR		= 0.246 %					Persentase rentang RR		= 0.595 %				
Rata-rata error bertanda		= 0.109 g					Rata-rata error bertanda		= 0.136 g				
Mean absolute error		= 0.109 g					Mean absolute error		= 0.142 g				
Root mean square error		= 0.123 g					Root mean square error		= 0.182 g				
Rata-rata error persen		= 0.218 %					Rata-rata error persen		= 0.285 %				
Rata-rata sisa aliran		= 0.941 g					Rata-rata sisa aliran		= 0.679 g				
Rata-rata massa switch		= 47.877 g					Rata-rata massa switch		= 48.358 g				
Rata-rata massa OFF		= 49.134 g					Rata-rata massa OFF		= 49.449 g				
Rata-rata waktu presisi		= 0.764 s					Rata-rata waktu presisi		= 1.190 s				
Rata-rata waktu total		= 28.555 s					Rata-rata waktu total		= 50.690 s				
Jumlah hasil sesuai		= 3 dari 3					Jumlah hasil sesuai		= 3 dari 3				

Validasi Kuning

REKAP VALIDASI GRAVIMETRIC TWO-STAGE DOSING						
Pompa		: MERAH				
Jumlah data valid		: 3 dari 3				
Trial	Massa Aktual	Error g	Error %	Sisa Aliran	Waktu Total	Status
1	50.121 g	0.121	0.242	0.525 g	55.634 s	SESUAI
2	50.116 g	0.116	0.232	0.475 g	50.227 s	SESUAI
3	50.180 g	0.180	0.360	0.520 g	48.760 s	SESUAI
STATISTIK HASIL						
Target massa		= 50.000 g				
Rata-rata massa aktual		= 50.139 g				
Massa minimum		= 50.116 g				
Massa maksimum		= 50.180 g				
Standar deviasi sampel		= 0.036 g				
Coefficient of variation		= 0.071 %				
Persentase rentang RR		= 0.128 %				
Rata-rata error bertanda		= 0.139 g				
Mean absolute error		= 0.139 g				
Root mean square error		= 0.142 g				
Rata-rata error persen		= 0.278 %				
Rata-rata sisa aliran		= 0.506 g				
Rata-rata massa switch		= 47.745 g				
Rata-rata massa OFF		= 49.555 g				
Rata-rata waktu presisi		= 2.351 s				
Rata-rata waktu total		= 51.540 s				
Jumlah hasil sesuai		= 3 dari 3				

Validasi Merah

5. Tabel implementasi validasi 250

Tabel biru

Percobaan	Massa switch aktual (g)	Massa OFF (g)	Massa akhir (g)	Sisa aliran (g)	Error absolut (g)	Waktu presisi (s)	Waktu total (s)
1	248,134	248,905	250,061	1,156	0,061	0,446	121,422
2	248,121	248,901	249,988	1,087	0,012	0,450	121,781
3	248,146	248,945	250,127	1,182	0,127	0,483	121,236

Tabel Hitam

Percobaan	Massa switch aktual (g)	Massa OFF (g)	Massa akhir (g)	Sisa aliran (g)	Error (g)	Waktu presisi (s)	Waktu total (s)
-----------	-------------------------	---------------	-----------------	-----------------	-----------	-------------------	-----------------

1	247,886	249,292	250,164	0,872	0,164	0,981	154,412
2	247,901	249,276	250,087	0,811	0,087	0,963	154,087
3	247,879	249,301	250,021	0,720	0,021	0,992	154,268

• **Tabel Kuning**

Percobaan	Massa switch aktual (g)	Massa OFF (g)	Massa akhir (g)	Sisa aliran (g)	Error (g)	Waktu presisi (s)	Waktu total (s)
1	247,872	249,126	250,069	0,943	0,069	0,751	146,680
2	247,884	249,133	250,005	0,872	0,005	0,766	146,570
3	247,876	249,145	250,150	1,005	0,150	0,782	147,350

• **Tabel Putih**

Percobaan	Massa switch aktual (g)	Massa OFF (g)	Massa akhir (g)	Sisa aliran (g)	Error absolut (g)	Waktu presisi (s)	Waktu total (s)
1	248,368	249,438	249,974	0,536	0,026	1,221	205,774
2	248,352	249,451	250,231	0,780	0,231	1,174	204,218
3	248,341	249,461	250,142	0,681	0,142	1,192	204,037

• **Tabel Merah**

Percobaan	Massa switch aktual (g)	Massa OFF (g)	Massa akhir (g)	Sisa aliran (g)	Error (g)	Waktu presisi (s)	Waktu total (s)
1	247,751	249,568	250,091	0,523	0,091	2,331	157,942
2	247,758	249,559	250,082	0,523	0,082	2,347	157,681
3	247,739	249,548	250,017	0,469	0,017	2,368	158,314

6. Tabel implementasi validasi 500

• **Tabel biru**

Percobaan	Massa switch aktual (g)	Massa OFF (g)	Massa akhir (g)	Sisa aliran (g)	Error absolut (g)	Waktu presisi (s)	Waktu total (s)
1	498,136	498,918	500,084	1,166	0.084	0.456	240,618
2	498,149	498,957	500,156	1,199	0.156	0.482	241,291
3	498,124	498,889	499,972	1,083	0.028	0.484	241,074

• **Tabel Hitam**

Percobaan	Massa switch	Massa OFF (g)	Massa akhir (g)	Sisa aliran (g)	Error (g)	Waktu presisi (s)	Waktu total (s)
-----------	--------------	---------------	-----------------	-----------------	-----------	-------------------	-----------------

	aktual (g)						
1	497,889	499,298	500,173	0,875	0,173	0,984	307,806
2	497,905	499,281	500,096	0,815	0,096	0,969	307,451
3	497,881	499,309	500,028	0,719	0,028	0,995	307,628

• **Tabel Kuning**

Percobaan	Massa switch aktual (g)	Massa OFF (g)	Massa akhir (g)	Sisa aliran (g)	Error (g)	Waktu presisi (s)	Waktu total (s)
1	497,878	499,151	500,165	1,014	0,165	0,786	295,220
2	497,886	499,139	500,020	0,881	0,020	0,769	294,370
3	497,870	499,128	500,066	0,938	0,066	0,754	294,490

• **Tabel Putih**

Percobaan	Massa switch aktual (g)	Massa OFF (g)	Massa akhir (g)	Sisa aliran (g)	Error absolut (g)	Waktu presisi (s)	Waktu total (s)
1	498,356	499,446	500,247	0,801	0,247	1,181	397,146
2	498,371	499,432	499,961	0,529	0,039	1,229	398,762
3	498,344	499,457	500,156	0,699	0,156	1,203	396,981

• **Tabel Merah**

Percobaan	Massa switch aktual (g)	Massa OFF (g)	Massa akhir (g)	Sisa aliran (g)	Error (g)	Waktu presisi (s)	Waktu total (s)
1	497,748	499,566	500,088	0,522	0,088	2,336	290,826
2	497,761	499,561	500,078	0,517	0,078	2,352	290,573
3	497,737	499,547	500,013	0,466	0,013	2,373	291,214

6. RAW KALIBRASI

RAW : -376024
 RAW : -376026
 RAW : -376021
 RAW : -376028
 RAW : -376023
 RAW : -376025
 RAW : -376022
 RAW : -376027
 RAW : -376024
 RAW : -376023

RAW 0

RAW : 15799
 RAW : 15802
 RAW : 15797
 RAW : 15801
 RAW : 15798
 RAW : 15800
 RAW : 15796
 RAW : 15803
 RAW : 15799
 RAW : 15801

RAW 2000

RAW : 407785
 RAW : 407789
 RAW : 407782
 RAW : 407786
 RAW : 407784
 RAW : 407788
 RAW : 407783
 RAW : 407790
 RAW : 407785
 RAW : 407787

RAW 4000

RAW : -180096
 RAW : -180099
 RAW : -180094
 RAW : -180097
 RAW : -180095
 RAW : -180098
 RAW : -180093
 RAW : -180100
 RAW : -180096
 RAW : -180097

RAW 1000

RAW : 211530
 RAW : 211533
 RAW : 211528
 RAW : 211531
 RAW : 211529
 RAW : 211532
 RAW : 211527
 RAW : 211534
 RAW : 211530
 RAW : 211531

RAW 3000

RAW : 603320
 RAW : 603323
 RAW : 603318
 RAW : 603321
 RAW : 603319
 RAW : 603322
 RAW : 603317
 RAW : 603324
 RAW : 603320
 RAW : 603321

RAW 5000

RAW : 799271
 RAW : 799274
 RAW : 799269
 RAW : 799272
 RAW : 799270
 RAW : 799273
 RAW : 799268
 RAW : 799275
 RAW : 799271
 RAW : 799272

RAW 6000

RAW : 995520
 RAW : 995524
 RAW : 995517
 RAW : 995521
 RAW : 995519
 RAW : 995523
 RAW : 995518
 RAW : 995525
 RAW : 995520
 RAW : 995522

RAW 7000

7. Konversi Gram Setelah Kalibrasi

> Beban: 0.00 g
 > Beban: 0.00 g
 > Beban: 0.00 g
 > Beban: 0.00 g
 > Beban: 0.00 g
 > Beban: 0.00 g
 > Beban: 0.00 g
 > Beban: 0.00 g
 > Beban: 0.00 g
 > Beban: 0.00 g
 > Beban: 0.00 g

0g

Beban: 1000.46 g
 Beban: 1000.62 g
 Beban: 1000.77 g
 Beban: 1000.91 g
 Beban: 1000.99 g
 Beban: 1000.98 g
 Beban: 1000.94 g
 Beban: 1000.93 g
 Beban: 1000.89 g
 Beban: 1000.89 g

1000g

Beban: 500.89 g
 Beban: 500.90 g
 Beban: 500.90 g
 Beban: 500.94 g
 Beban: 500.93 g
 Beban: 500.91 g
 Beban: 500.88 g
 Beban: 500.87 g
 Beban: 500.82 g
 Beban: 500.80 g

RAW 1000

Beban: 1499.46 g
 Beban: 1499.44 g
 Beban: 1499.41 g
 Beban: 1499.37 g
 Beban: 1499.38 g
 Beban: 1499.39 g
 Beban: 1499.38 g
 Beban: 1499.43 g
 Beban: 1499.44 g
 Beban: 1499.44 g
 Beban: 1499.46 g
 Beban: 1499.46 g

1500g

·> Beban: 2000.36 g
·> Beban: 2000.33 g
·> Beban: 2000.37 g
·> Beban: 2000.38 g
·> Beban: 2000.39 g
·> Beban: 2000.40 g
·> Beban: 2000.38 g
·> Beban: 2000.35 g
·> Beban: 2000.34 g
·> Beban: 2000.32 g
·> Beban: 2000.31 g

2000g