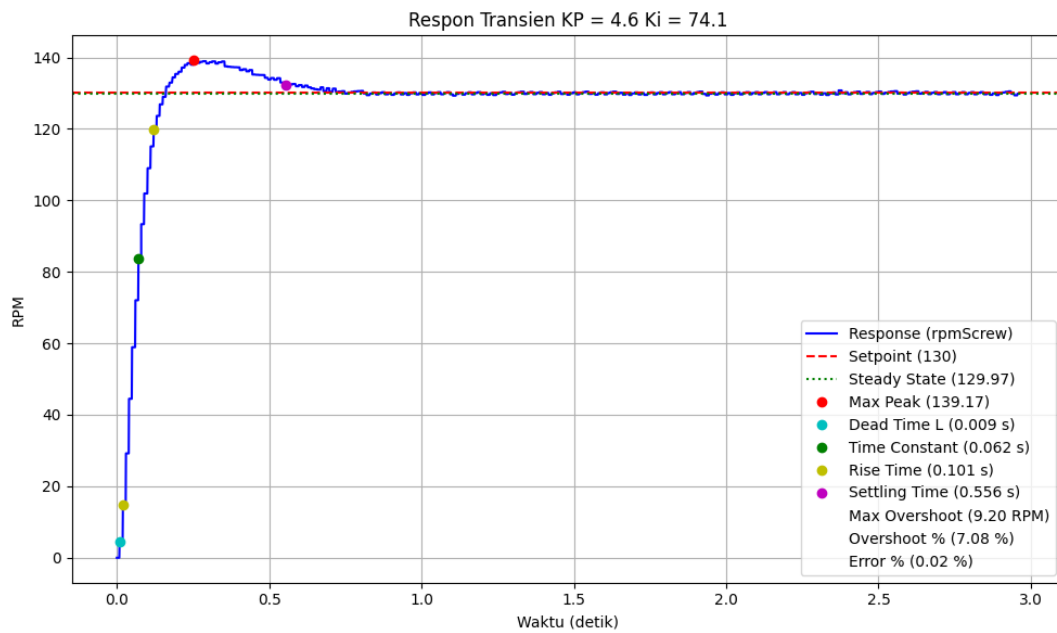


BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1. Hasil Pengujian Respon Transien Kendali Proportional Integral

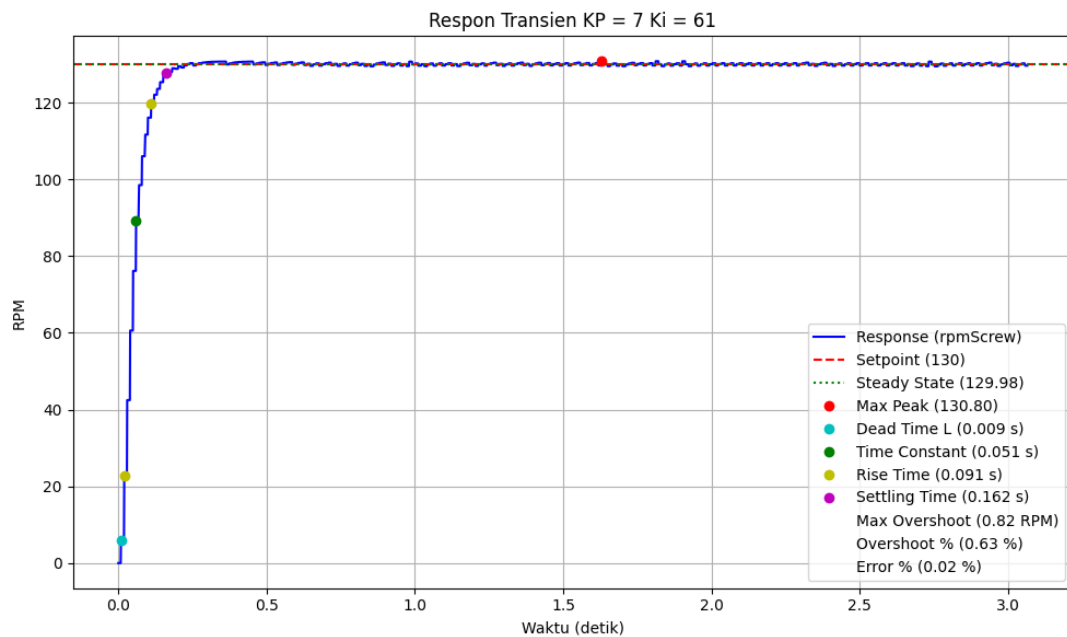
Melalui Metode Ziegler Nichols Orde 1, diperoleh nilai K_p sebesar 4.6 dan K_i sebesar 74.12 Setelah diterapkan kepada sistem, diperoleh respon transien seperti pada **Gambar 4.1** berikut,



Gambar 4. 1 Respon Transien Motor DC Pada K_p 4.6 dan K_i 74.1

Berdasarkan grafik pada **Gambar 4.1**, respon transien sistem dengan parameter pengendali PI sebesar $K_p = 4,6$ dan $K_i = 74,1$ memperoleh *rise time* sebesar 0,101 s dan *time constant* sebesar 0,062 s, lebih cepat dibandingkan dengan *open-loop*. *dead time* yang diperoleh masih sama dengan *open-loop* yaitu sebesar 0,009 s. Setelah mencapai puncak respon sebesar 139,17 RPM, sistem mengalami *overshoot* sebesar 7,08% atau sekitar 9,20 RPM terhadap nilai setpoint. Selanjutnya kecepatan motor menurun secara bertahap hingga memasuki kondisi tunak pada waktu 0,556 s dengan nilai *steady-state* sebesar 129,97 RPM. Pada kondisi tunak, selisih terhadap setpoint hanya sebesar 0,02% sehingga menunjukkan bahwa aksi integral mampu menghilangkan *steady-state error* secara efektif. Meskipun sistem memiliki waktu respon yang cepat, besarnya *overshoot* pada respon sebelumnya menunjukkan bahwa parameter hasil penalaan awal metode Ziegler-Nichols masih

perlu disempurnakan agar lebih sesuai dengan karakteristik sistem dispenser. Oleh karena itu, dilakukan proses *fine tuning* terhadap parameter K_p dan K_i dengan tujuan mengurangi *overshoot* tanpa mengorbankan kecepatan respon maupun kestabilan sistem. Hasil respon transien setelah proses *fine tuning* ditunjukkan pada **Gambar 4.2**.



Gambar 4. 2 Respon Transien Motor DC Pada Kp 7 dan Ki 61

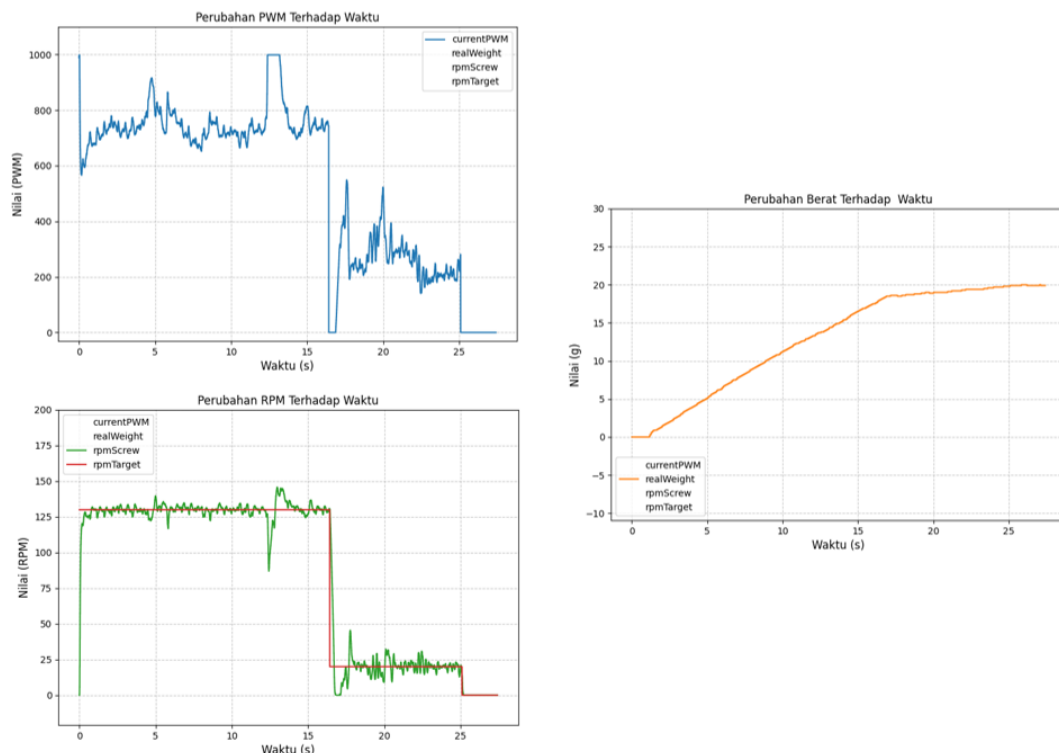
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.2, respon transien sistem setelah proses *fine tuning* dengan parameter pengendali PI sebesar $K_p = 7$ dan $K_i = 61$ menunjukkan peningkatan performa dibandingkan parameter sebelumnya. Sistem mampu mencapai nilai setpoint sebesar 130 RPM dengan *rise time* sebesar 0,091 s dan *dead time* sebesar 0,009 s. Nilai puncak respon tercatat sebesar 130,80 RPM sehingga *overshoot* berhasil ditekan menjadi hanya 0,63% atau sekitar 0,82 RPM. Selain itu, sistem mencapai kondisi tunak pada waktu 0,162 s dengan nilai *steady-state* sebesar 129,98 RPM serta *steady-state error* sebesar 0,02% masih jauh dibawah ambang toleransi yang disebutkan pada buku “*Modern Control Engineering*” baik 5% maupun 2%, yang menunjukkan bahwa kecepatan motor dapat dipertahankan sangat dekat dengan nilai referensi.

Karakteristik respon tersebut menunjukkan bahwa parameter PI hasil *fine tuning* mampu memberikan keseimbangan antara kecepatan respon dan kestabilan sistem. Nilai *overshoot* yang sangat kecil mengurangi perubahan kecepatan motor

secara berlebihan sehingga laju pengeluaran bumbu menjadi lebih konstan. Kondisi ini penting karena selama proses dispensing dapat terjadi peningkatan beban akibat penumpukan atau pemadatan material pada mekanisme *screw feeder*. Peningkatan beban tersebut menyebabkan torsi yang dibutuhkan motor bertambah dan berpotensi menurunkan putaran motor bahkan mengarah pada kondisi *stall*. Dengan adanya pengendali PI yang memanfaatkan umpan balik encoder, penurunan kecepatan dapat segera dideteksi sebagai sinyal *error*, kemudian pengendali akan meningkatkan sinyal PWM hingga kecepatan motor kembali mendekati nilai setpoint. Sebaliknya, jika terjadi kenaikan percepatan lebih dari setpoint, akan dideteksi sebagai error dengan nilai negatif, kemudian pengendali akan menurunkan PWM hingga kecepatan motor kembali mendekati nilai setpoint. Oleh karena itu, parameter $K_p = 7$ dan $K_i = 61$ dipilih sebagai parameter kendali karena mampu mempertahankan kestabilan putaran motor ketika menghadapi gangguan beban (*disturbance*), sehingga proses dispensing berlangsung lebih lancar dan menghasilkan penakaran yang lebih konsisten.

4.2. Pengaruh Pengendali PI terhadap *Dispensing*

Untuk mengevaluasi pengaruh penerapan pengendali *Proportional Integral* (PI) terhadap proses *dispensing*, dilakukan pengujian dengan mengamati hubungan antara perubahan sinyal kendali PWM, putaran motor DC hasil pembacaan encoder, serta perubahan berat material terhadap waktu selama proses *dispensing*. Pengujian dilakukan menggunakan material cabai bubuk kasar dengan target berat sebesar 20 gram. Parameter pengendali PI yang digunakan merupakan hasil *fine tuning* dari parameter awal metode Ziegler–Nichols sehingga diperoleh respon putaran motor yang stabil pada proses *dispensing*. Hasil pengujian ditunjukkan pada **Gambar 4.3**



Gambar 4. 3 Grafik Hubungan PWM, RPM, dan Gram dalam Proses Dispensing

Berdasarkan grafik perubahan RPM terhadap waktu, terlihat bahwa pada awal proses dispensing putaran motor mampu mengikuti nilai setpoint sebesar sekitar 130 RPM. Namun, pada beberapa waktu tertentu terjadi penurunan RPM yang cukup signifikan hingga berada di bawah nilai setpoint. Penurunan ini disebabkan oleh adanya hambatan aliran material pada screw feeder akibat cabai bubuk yang sesekali tersangkut sehingga beban motor meningkat. Meskipun demikian, pengendali PI mampu mengoreksi kondisi tersebut dengan cepat sehingga putaran motor kembali mendekati nilai setpoint. Bahkan sesaat setelah gangguan hilang, RPM terukur mengalami sedikit *overshoot* sebelum kembali stabil mengikuti nilai yang diinginkan. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali PI mampu mempertahankan kestabilan kecepatan putar motor meskipun terjadi perubahan beban selama proses dispensing.

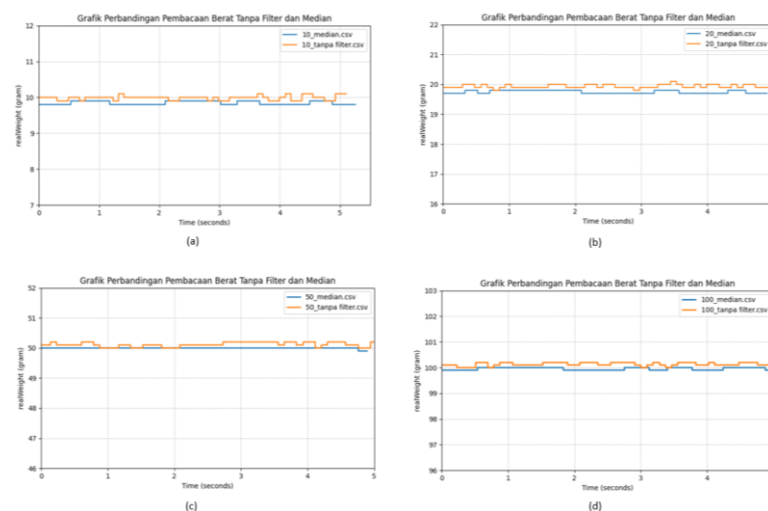
Kondisi tersebut juga terlihat pada grafik perubahan PWM terhadap waktu. Ketika RPM motor mengalami penurunan akibat meningkatnya beban, nilai PWM secara otomatis meningkat hingga mendekati batas maksimum sebagai respon pengendali PI untuk menghasilkan torsi yang lebih besar. Setelah putaran motor kembali mendekati setpoint, nilai PWM secara bertahap menurun menuju kondisi

yang diperlukan untuk mempertahankan kecepatan tersebut. Perubahan PWM yang mengikuti kondisi beban menunjukkan bahwa pengendali PI secara kontinu menyesuaikan sinyal kendali berdasarkan selisih antara RPM target dan RPM aktual sehingga motor tetap mampu beroperasi pada kecepatan yang diinginkan.

Pengaruh pengendali PI terhadap hasil *dispensing* dapat diamati pada grafik perubahan berat terhadap waktu. Meskipun pada grafik RPM terlihat adanya fluktuasi kecepatan akibat material yang tersangkut, laju pertambahan berat tetap berlangsung secara relatif konstan tanpa penurunan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa gangguan yang terjadi pada putaran motor hanya berlangsung dalam waktu singkat karena segera dikompensasi oleh pengendali PI melalui penyesuaian nilai PWM. Akibatnya, proses dispensing tetap berlangsung secara kontinu hingga mencapai target berat 20 gram. Dengan demikian, penerapan pengendali PI berhasil mempertahankan kestabilan proses dispensing dengan menjaga kecepatan putar motor terhadap gangguan beban, sehingga laju pengeluaran material tetap terjaga selama proses penakaran berlangsung.

4.3. Hasil Pengujian Kestabilan dan Akurasi Loadcell

Hasil pengujian kestabilan pembacaan load cell menggunakan metode tanpa filter dan median filter ditunjukkan pada **Gambar 4.3**. **Gambar 4.3(a)** hingga **Gambar 4.3(d)** masing-masing memperlihatkan hasil pembacaan pada berat referensi 10 g, 20 g, 50 g, dan 100 g selama periode pengamatan 5 detik.



Gambar 4. 4 a.) Pengujian Pada 10gr. **b.)** Pengujian Pada 20gr **c.)** Pengujian Pada 50gr. **d.)** Pengujian Pada 100gr

Berdasarkan **Gambar 4.3(a)**, pembacaan pada berat referensi 10 g menunjukkan bahwa kedua metode mampu mempertahankan nilai pembacaan di sekitar berat referensi. Namun, kurva hasil median filter terlihat lebih halus dengan perubahan nilai yang lebih sedikit dibandingkan pembacaan tanpa filter. Hal tersebut menunjukkan bahwa median filter mampu meredam fluktuasi pembacaan yang berasal dari gangguan (*noise*) tanpa mengubah karakteristik umum sinyal.

Pada **Gambar 4.3(b)** dengan berat referensi 20 g, karakteristik yang serupa juga terlihat. Pembacaan tanpa filter mengalami perubahan nilai yang lebih sering, sedangkan median filter menghasilkan sinyal yang lebih stabil. Meskipun demikian, nilai pembacaan median filter cenderung berada sedikit di bawah berat referensi, sehingga secara visual tampak memiliki penyimpangan rata-rata yang lebih besar dibandingkan metode tanpa filter.

Hasil pengujian pada **Gambar 4.3(c)** untuk berat referensi 50 g menunjukkan bahwa median filter memberikan performa yang lebih baik dibandingkan pembacaan tanpa filter. Selain menghasilkan kurva yang lebih halus, nilai pembacaan juga berada lebih dekat terhadap berat referensi sehingga fluktuasi maupun penyimpangan pembacaan menjadi lebih kecil.

Karakteristik yang sama juga terlihat pada **Gambar 4.3(d)** dengan berat referensi 100 g. Pembacaan menggunakan median filter menghasilkan kurva yang lebih stabil dibandingkan pembacaan tanpa filter, sementara nilai pembacaan tetap berada sangat dekat dengan berat referensi. Hal ini menunjukkan bahwa median filter mampu meningkatkan kestabilan pembacaan tanpa memberikan penyimpangan yang berarti pada pengukuran beban yang lebih besar. Untuk lebih jelasnya, disajikan hasil perbandingan Pembacaan berat pada **Tabel 4.1**

Tabel 4. 1 Perbandingan Pembacaan Berat Dengan filter dan Tanpa filter

Metode	Berat Referensi (g)	Rata-rata (g)	Error (%)	Standar Deviasi (g)
Tanpa Filter	10	9.99	0.14	0.061
	20	19.94	0.31	0.059
	50	50.12	0.23	0.074
	100	100.13	0.13	0.067
Median	10	9.84	1.55	0.050
	20	19.75	1.27	0.050
	50	50.00	0.01	0.016
	100	99.95	0.05	0.050

Berdasarkan Tabel 4.1, penerapan median filter mampu menurunkan standar deviasi pada seluruh variasi berat yang diuji. Pada berat referensi 10 g, standar deviasi menurun dari 0,061 g menjadi 0,050 g atau berkurang sekitar 18,0%. Pada berat 20 g terjadi penurunan dari 0,059 g menjadi 0,050 g atau sekitar 15,3%. Penurunan terbesar terjadi pada berat 50 g, yaitu dari 0,074 g menjadi 0,016 g, sehingga fluktuasi pembacaan berkurang sekitar 78,4%. Sementara itu, pada berat 100 g standar deviasi turun dari 0,067 g menjadi 0,050 g atau sekitar 25,4%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa median filter secara konsisten mampu meningkatkan presisi pembacaan load cell dengan mengurangi variasi data hasil pengukuran.

Ditinjau dari aspek akurasi, median filter memberikan hasil yang berbeda pada setiap variasi berat. Pada berat referensi 10 g dan 20 g, nilai error meningkat masing-masing dari 0,14% menjadi 1,55% serta dari 0,31% menjadi 1,27%. Sebaliknya, pada berat referensi 50 g dan 100 g, median filter justru meningkatkan akurasi dengan menurunkan error dari 0,23% menjadi 0,01% dan dari 0,13% menjadi 0,05%. Hal ini menunjukkan bahwa median filter lebih efektif diterapkan pada rentang pengukuran menengah hingga tinggi, sedangkan pada beban yang relatif kecil masih terdapat kecenderungan terbentuknya bias akibat proses pemilihan nilai median.

Secara keseluruhan, median filter berhasil meningkatkan kestabilan pembacaan load cell yang ditunjukkan oleh penurunan standar deviasi pada seluruh pengujian. Meskipun akurasi pada beban rendah sedikit menurun, peningkatan kestabilan sinyal yang diperoleh memberikan keuntungan pada sistem penakaran karena pembacaan berat menjadi lebih konsisten dan tidak mudah dipengaruhi oleh fluktuasi sesaat selama proses dispensing.

Peningkatan nilai *error* pada beberapa variasi berat, khususnya pada pengukuran 10 g dan 20 g, dipengaruhi oleh proses kalibrasi load cell dalam menentukan nilai referensi (*raw ADC*). Pada tahap kalibrasi, keluaran mentah (*raw value*) dari modul HX711 masih mengalami fluktuasi yang cukup besar akibat *noise* dan karakteristik sensor, sehingga penentuan nilai *raw* yang mewakili berat referensi menjadi kurang presisi. Ketidaktepatan dalam menentukan nilai *raw ADC* tersebut akan memengaruhi faktor kalibrasi yang digunakan pada proses konversi menjadi satuan gram. Akibatnya, seluruh hasil pembacaan dapat mengalami

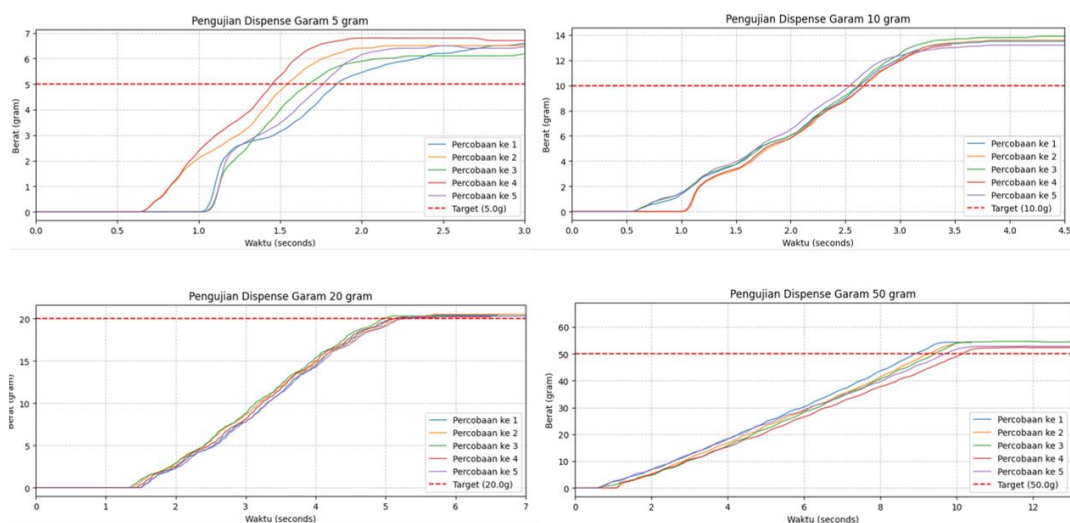
pergeseran (*offset*) terhadap nilai referensi sehingga meningkatkan persentase *error*, meskipun pembacaan yang dihasilkan tetap memiliki kestabilan yang baik. Oleh karena itu, akurasi sistem tidak hanya dipengaruhi oleh metode penyaringan (*filtering*), tetapi juga sangat bergantung pada ketelitian proses kalibrasi sensor load cell.

4.4. Hasil Pengujian Dispensing

Pengujian Dispensing dilakukan pada setiap jenis material bubuk yaitu Garam, Cabai Bubuk, Merica dan ketumbar. Masing jenis material bubuk dilakukan pengujian pada 4 berat berbeda yaitu 5 gram, 10 gram 20 gram dan 50 gram. Masing masing berat dilakukan pengujian sebanyak 5 kali sehingga total data yang akan diambil adalah 80 data percobaan.

4.3.1. Hasil Dispensing Garam

Hasil pengujian dispensing pada material garam disajikan pada grafik pada **Gambar 4.5** berikut



Gambar 4.5 Grafik Pengujian Dispense Material Bubuk Garam

Berdasarkan **Gambar 4.5**, seluruh pengujian material garam menunjukkan pola kenaikan berat yang kontinu hingga mencapai target penimbangan. Setiap kurva merepresentasikan lima kali percobaan pada masing-masing target berat, dengan garis putus-putus merah sebagai nilai referensi. Secara umum, bentuk kurva pada seluruh target menunjukkan karakteristik yang serupa, yaitu kenaikan massa yang hampir linier terhadap waktu hingga proses dispensing dihentikan. Semakin besar target berat yang diberikan, semakin lama waktu yang dibutuhkan sistem

untuk mencapai berat referensi. Hal ini ditunjukkan oleh rata-rata waktu dispensing sebesar 2,62 s, 3,62 s, 5,95 s, dan 10,46 s berturut-turut untuk target 5 g, 10 g, 20 g, dan 50 g.

Pada target 20 g, kelima kurva terlihat hampir saling berhimpit sehingga menunjukkan konsistensi laju pengeluaran material yang baik. Sementara itu, pada target 5 g, 10 g, dan 50 g masih terlihat sedikit variasi antar percobaan, terutama menjelang akhir proses dispensing. Meskipun demikian, seluruh percobaan berhasil mencapai target tanpa mengalami gangguan aliran material maupun penghentian proses yang tidak normal. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa mekanisme *screw feeder* mampu mengeluarkan material garam secara kontinu dengan karakteristik laju aliran yang relatif konstan pada seluruh variasi target berat. Rekapitulasi hasil pengujian dispensing material garam pada keempat target berat disajikan pada **Tabel 4.2** berikut.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Dispense material Garam

Target Berat (g)	Waktu Dispensing Rata-rata (s)	Error Rata-rata (g)	Error Rata-rata (%)	Standar Deviasi (g)
5	2.62	1.62	32	0.2949576
10	3.62	3.56	36	0.2509980
20	5.95	0.58	3	0.0836660
50	10.46	3.72	7	1.0497619

Berdasarkan **Tabel 4.2**, waktu dispensing meningkat seiring bertambahnya target berat yang diberikan. Rata-rata waktu dispensing berturut-turut sebesar 2,62 s, 3,62 s, 5,95 s, dan 10,46 s untuk target 5 g, 10 g, 20 g, dan 50 g. Hasil ini menunjukkan bahwa mekanisme *screw feeder* memiliki karakteristik laju pengeluaran material yang relatif konstan sehingga waktu dispensing berbanding lurus dengan jumlah material yang dikeluarkan.

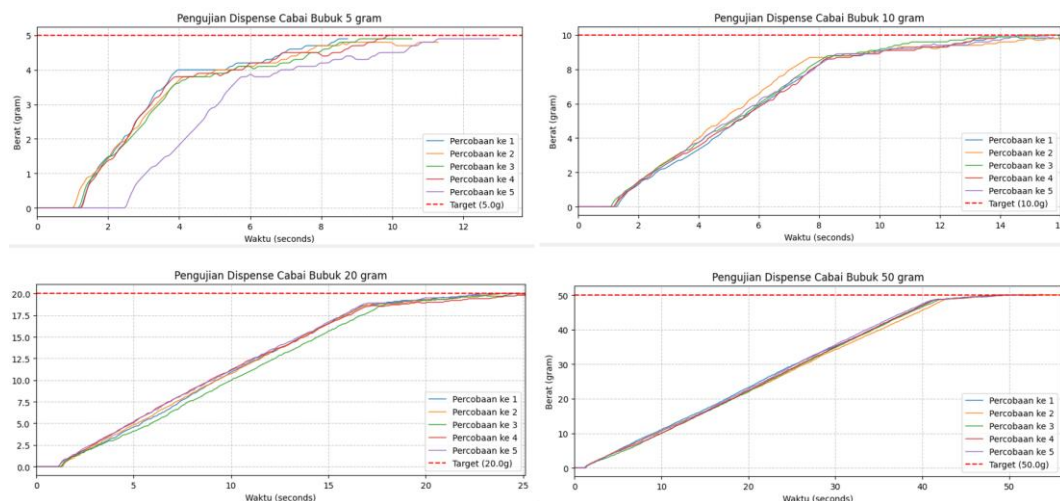
Dari sisi akurasi, diperoleh *error* rata-rata sebesar 1,62 g (32%) pada target 5 g, 3,56 g (36%) pada target 10 g, 0,58 g (3%) pada target 20 g, dan 3,72 g (7%) pada target 50 g. Nilai *error* terbesar terjadi pada target 10 g, sedangkan performa terbaik diperoleh pada target 20 g dengan *error* hanya 3%. Ditinjau dari konsistensi hasil, standar deviasi terkecil juga diperoleh pada target 20 g, yaitu sebesar 0,0837 g, yang menunjukkan hasil dispensing antar percobaan paling seragam. Sebaliknya, target

50 g memiliki standar deviasi terbesar sebesar 1,0498 g, meskipun secara persentase *error* masih tergolong rendah.

Karakteristik tersebut dipengaruhi oleh sifat fisik material garam yang memiliki ukuran butiran relatif besar, massa jenis tinggi, serta sifat *free flowing* sehingga material mudah mengalir keluar dari *screw feeder*. Akibatnya, beban mekanis pada motor dispenser relatif kecil sehingga pengendali PI mampu mempertahankan kecepatan motor mendekati nilai maksimum hampir sepanjang proses dispensing. Kondisi ini menyebabkan transisi dari fase *bulk* menuju *fine dispensing* tidak tampak secara signifikan karena putaran motor tidak mengalami penurunan yang berarti ketika mendekati target berat. Laju aliran material yang tetap tinggi mengakibatkan material masih terus keluar sesaat sebelum motor berhenti, sehingga terjadi kecenderungan *overshoot*, terutama pada target berat yang kecil seperti 5 g dan 10 g. Sebaliknya, pada target yang lebih besar, tambahan massa akibat *overshoot* menjadi relatif lebih kecil dibandingkan total target sehingga persentase *error* menurun dan akurasi sistem menjadi lebih baik.

4.3.2. Hasil Dispensing Cabai Bubuk

Hasil pengujian dispensing material cabai bubuk pada target berat 5 g, 10 g, 20 g, dan 50 g disajikan pada **Gambar 4.6** berikut.



Gambar 4. 6 Grafik Pengujian Dispense Material Cabai Bubuk

Berdasarkan **Gambar 4.6**, seluruh pengujian material cabai bubuk menunjukkan pola kenaikan berat yang berlangsung secara bertahap hingga mencapai target penimbangan. Berbeda dengan material garam, kurva pada

material cabai bubuk memiliki kemiringan yang lebih landai sehingga waktu dispensing menjadi lebih lama pada seluruh target berat.

Pada target 5 g, masih terlihat variasi antar percobaan, terutama pada percobaan kelima yang memiliki waktu dispensing lebih lama dibandingkan percobaan lainnya. Meskipun demikian, seluruh percobaan tetap berhasil mencapai target tanpa mengalami *overshoot* yang signifikan. Pada target 10 g, 20 g, dan 50 g, seluruh kurva terlihat hampir saling berhimpit sehingga menunjukkan konsistensi proses dispensing yang sangat baik. Selain itu, tidak terlihat lonjakan berat secara tiba-tiba pada akhir proses dispensing, yang menunjukkan bahwa transisi antara fase *bulk dispensing* dan *fine dispensing* berlangsung secara lebih halus dibandingkan material garam. Karakteristik ini menghasilkan kenaikan berat yang lebih terkendali hingga mendekati nilai referensi pada setiap variasi target. Rekapitulasi hasil pengujian dispensing material cabai bubuk pada keempat target berat disajikan pada **Tabel 4.3** berikut.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Dispense Material Cabai Bubuk

Target Berat (g)	Waktu Dispensing Rata-rata (s)	Error Rata-rata (g)	Error Rata-rata (%)	Standar Deviasi (g)
5	4.62	0.10	2	0.0707107
10	8.56	0.04	0	0.0547723
20	17.45	0.02	0	0.0447214
50	42.02	0.00	0	0.0000000

Berdasarkan **Tabel 4.3**, waktu dispensing material cabai bubuk meningkat secara proporsional terhadap target berat, yaitu sebesar 4,62 s, 8,56 s, 17,45 s, dan 42,02 s untuk target berturut-turut 5 g, 10 g, 20 g, dan 50 g. Waktu dispensing yang relatif lebih lama dibandingkan material garam menunjukkan bahwa laju pengeluaran cabai bubuk lebih rendah, sehingga sistem memiliki waktu yang lebih panjang untuk melakukan koreksi sebelum mencapai target berat.

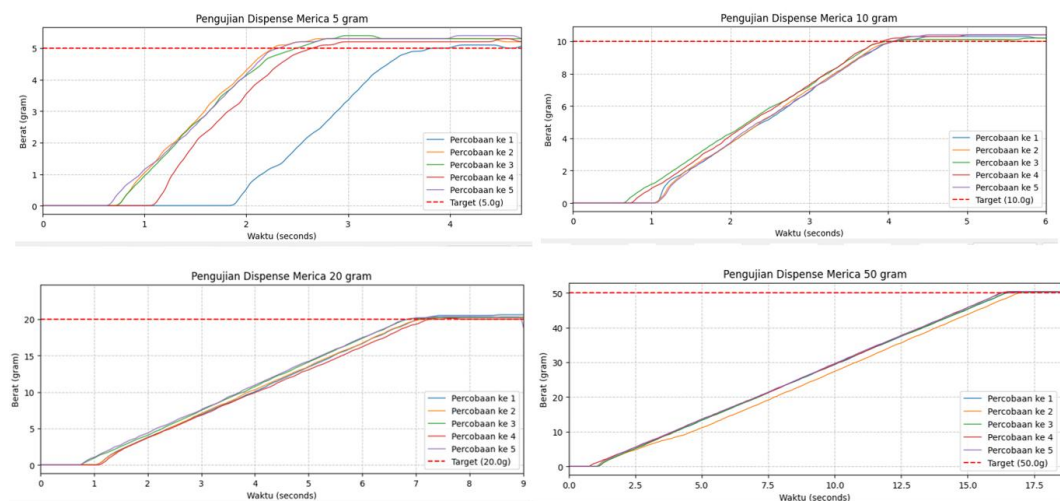
Ditinjau dari aspek akurasi, material cabai bubuk menunjukkan performa yang sangat baik. Pada target 5 g, diperoleh *error* rata-rata sebesar 0,10 g atau 2%, sedangkan pada target 10 g, 20 g, dan 50 g nilai *error* rata-rata berturut-turut hanya 0,04 g, 0,02 g, dan 0,00 g, yang dibulatkan menjadi 0% terhadap berat referensi. Dari sisi konsistensi, standar deviasi juga mengalami penurunan seiring

bertambahnya target berat, yaitu dari 0,0707 g pada target 5 g menjadi 0,0548 g pada 10 g, 0,0447 g pada 20 g, hingga 0,0000 g pada target 50 g. Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh percobaan pada target 50 g menghasilkan berat akhir yang sama sehingga tidak terdapat variasi antar pengujian.

Performa dispensing yang lebih baik dibandingkan material garam dipengaruhi oleh karakteristik fisik cabai bubuk yang memiliki ukuran partikel lebih ppih sehingga laju keluaran material melalui *screw feeder* menjadi lebih lambat dan lebih mudah dikendalikan. Kondisi ini memungkinkan pengendali PI melakukan transisi dari fase *bulk dispensing* menuju *fine dispensing* secara lebih efektif, sehingga kecepatan pengeluaran material menurun ketika mendekati target berat. Akibatnya, material yang masih keluar setelah motor berhenti menjadi sangat sedikit sehingga *overshoot* dapat diminimalkan. Meskipun waktu dispensing menjadi lebih panjang, karakteristik tersebut justru menghasilkan tingkat akurasi dan konsistensi yang jauh lebih baik dibandingkan material garam, terutama pada target berat menengah hingga besar.

4.3.3. Hasil Dispensing Merica

Hasil pengujian dispensing material merica pada target berat 5 g, 10 g, 20 g, dan 50 g disajikan pada **Gambar 4.7** berikut.



Gambar 4. 7 Grafik Pengujian Dispense Material Bubuk Merica

Berdasarkan **Gambar 4.7**, seluruh pengujian material merica menunjukkan pola kenaikan berat yang relatif linier hingga mencapai target penimbangan. Dibandingkan material garam, laju kenaikan massa pada material merica lebih

terkendali sehingga seluruh kurva mendekati target secara bertahap tanpa menunjukkan *overshoot* yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme *screw feeder* mampu mengeluarkan material merica secara stabil pada berbagai target berat.

Pada target 5 g, masih terlihat variasi antar percobaan, khususnya pada percobaan pertama yang memiliki waktu dispensing lebih lama dibandingkan empat percobaan lainnya. Meskipun demikian, seluruh percobaan tetap berhasil mencapai target dengan penyimpangan yang relatif kecil. Pada target 10 g, 20 g, dan 50 g, kelima kurva semakin berhimpit sehingga menunjukkan peningkatan konsistensi proses dispensing. Kenaikan berat berlangsung hampir seragam hingga mendekati target, kemudian melambat pada akhir proses sebagai indikasi bahwa fase *fine dispensing* telah bekerja dengan baik untuk mengurangi laju pengeluaran material menjelang target berat tercapai.

Rekapitulasi hasil pengujian dispensing material merica pada keempat target berat disajikan pada **Tabel 4.4** berikut.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Dispense material Merica

Target Berat (g)	Waktu Dispensing Rata-rata (s)	Error Rata-rata (g)	Error Rata-rata (%)	Standar Deviasi (g)
5	3.30	0.18	4	0.1788854
10	4.63	0.14	1	0.2190890
20	7.62	0.02	0	0.0447214
50	16.92	0.22	0	0.1923538

Berdasarkan **Tabel 4.4**, waktu dispensing meningkat seiring bertambahnya target berat, yaitu sebesar 3,30 s, 4,63 s, 7,62 s, dan 16,92 s masing-masing untuk target 5 g, 10 g, 20 g, dan 50 g. Dibandingkan material cabai bubuk, waktu dispensing material merica jauh lebih singkat, menunjukkan bahwa laju aliran material melalui *screw feeder* lebih tinggi namun masih dapat dikendalikan dengan baik oleh sistem.

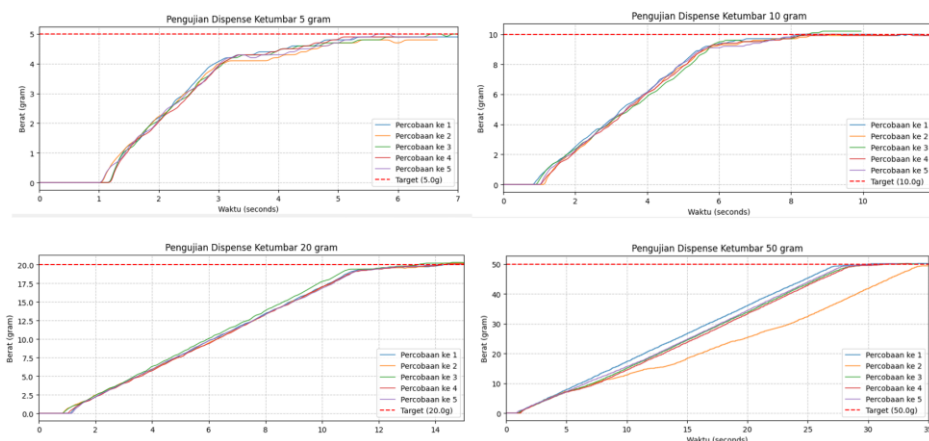
Dari aspek akurasi, diperoleh *error* rata-rata sebesar 0,18 g (4%) pada target 5 g, 0,14 g (1%) pada target 10 g, 0,02 g (0%) pada target 20 g, dan 0,22 g (0%) pada target 50 g. Nilai tersebut menunjukkan bahwa seluruh pengujian menghasilkan penyimpangan yang sangat kecil terhadap target berat, terutama pada target 20 g

dan 50 g yang memiliki persentase *error* di bawah 1%. Dari sisi konsistensi, standar deviasi terkecil diperoleh pada target 20 g, yaitu sebesar 0,0447 g, sedangkan standar deviasi terbesar terjadi pada target 10 g, yaitu 0,2191 g. Meskipun demikian, seluruh nilai standar deviasi masih berada di bawah 0,25 g, sehingga menunjukkan bahwa variasi hasil dispensing antar percobaan relatif kecil.

Performa dispensing material merica dipengaruhi oleh karakteristik partikelnya yang memiliki ukuran lebih kecil dibandingkan garam, namun tidak konsisten. Karakteristik tersebut menghasilkan laju aliran material yang cukup stabil sehingga pengendali PI dapat melakukan transisi antara fase *bulk dispensing* dan *fine dispensing* secara efektif. Akibatnya, sistem mampu mengurangi kecepatan pengeluaran material ketika mendekati target berat sehingga *overshoot* dapat diminimalkan tanpa menyebabkan waktu dispensing menjadi terlalu lama. Kombinasi antara waktu dispensing yang relatif singkat, *error* yang rendah, dan konsistensi hasil yang baik menunjukkan bahwa material merica merupakan salah satu material yang paling sesuai dengan karakteristik mekanisme *screw feeder* yang digunakan pada penelitian ini.

4.3.4. Hasil Dispensing Ketumbar

Hasil pengujian dispensing material ketumbar pada target berat 5 g, 10 g, 20 g, dan 50 g disajikan pada **Gambar 4.8** berikut.



Gambar 4.8 Grafik Pengujian Dispense Material Bubuk Ketumbar

Berdasarkan **Gambar 4.8**, proses dispensing material ketumbar menunjukkan pola kenaikan berat yang relatif linier hingga mendekati target penimbangan pada seluruh variasi berat. Dibandingkan material garam, laju

kenaikan massa terlihat lebih landai sehingga sistem memiliki waktu yang lebih cukup untuk melakukan koreksi sebelum mencapai target. Seluruh kurva berhasil mencapai berat referensi tanpa menunjukkan *overshoot* yang berarti, menandakan bahwa pengendali PI mampu mengendalikan proses dispensing dengan baik.

Pada target 5 g, kelima kurva memiliki bentuk yang hampir serupa dengan sedikit variasi menjelang akhir proses dispensing. Variasi tersebut semakin kecil pada target 10 g dan 20 g, di mana seluruh kurva hampir saling berhimpit dari awal hingga akhir proses. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme *screw feeder* menghasilkan laju pengeluaran material yang konsisten pada kedua target tersebut. Pada target 50 g, sebagian besar percobaan juga menunjukkan karakteristik yang serupa, meskipun percobaan kedua memiliki waktu dispensing yang lebih lama dibandingkan percobaan lainnya. Meskipun demikian, seluruh percobaan tetap berhasil mencapai target berat sebesar 50 g, sehingga sistem mampu menyelesaikan proses dispensing tanpa mengalami kegagalan. Rekapitulasi hasil pengujian dispensing material ketumbar pada keempat target berat disajikan pada **Tabel 4.5** berikut.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Dispense material Ketumbar

Target Berat (g)	Waktu Dispensing Rata-rata (s)	Error Rata-rata (g)	Error Rata-rata (%)	Standar Deviasi (g)
5	3.49	0.14	3	0.0547723
10	6.67	0.00	0	0.0000000
20	11.48	0.04	0	0.0547723
50	30.20	0.00	0	0.0000000

Berdasarkan **Tabel 4.5**, rata-rata waktu dispensing meningkat seiring bertambahnya target berat, yaitu sebesar 3,49 s, 6,67 s, 11,48 s, dan 30,20 s masing-masing untuk target 5 g, 10 g, 20 g, dan 50 g. Peningkatan waktu dispensing tersebut menunjukkan bahwa laju pengeluaran material ketumbar relatif konstan pada seluruh variasi target sehingga proses dispensing berlangsung secara stabil.

Ditinjau dari aspek akurasi, material ketumbar menunjukkan performa yang sangat baik. Pada target 5 g, diperoleh *error* rata-rata sebesar 0,14 g atau 3%, sedangkan pada target 10 g dan 50 g tidak ditemukan *error* rata-rata sehingga persentase *error* bernilai 0%. Pada target 20 g, *error* rata-rata hanya sebesar 0,04 g

atau dibulatkan menjadi 0% terhadap berat referensi. Dari sisi konsistensi, standar deviasi sebesar 0,0000 g pada target 10 g dan 50 g menunjukkan bahwa seluruh hasil pengujian menghasilkan berat akhir yang sama, sedangkan pada target 5 g dan 20 g standar deviasi hanya sebesar 0,0548 g, yang masih menunjukkan variasi antar percobaan sangat kecil.

Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa material ketumbar memiliki perilaku aliran yang sesuai dengan mekanisme *screw feeder* pada penelitian ini. Ukuran partikel yang relatif seragam menghasilkan laju pengeluaran material yang stabil sehingga pengendali PI mampu melakukan transisi dari fase *bulk dispensing* menuju *fine dispensing* secara efektif. Akibatnya, kecepatan pengeluaran material dapat dikurangi ketika mendekati target berat sehingga *overshoot* berhasil diminimalkan. Meskipun pada target 50 g terdapat satu percobaan yang membutuhkan waktu dispensing lebih lama dibandingkan percobaan lainnya, seluruh hasil penakaran tetap mencapai target berat yang diinginkan. Secara keseluruhan, material ketumbar menunjukkan tingkat akurasi dan konsistensi yang sangat baik, sehingga menjadi salah satu material dengan performa dispensing terbaik pada sistem yang dirancang

4.5. Hasil Pengujian Komunikasi Sistem

Setelah data log diolah, diperoleh hasil pengujian komunikasi sistem disajikan dengan gambar **Tabel 4.6** berikut.

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Latensi Komunikasi Sistem

Alur Data	Fungsi	Paket Berhasil	Paket Gagal	Rata rata Latensi (ms)
Raspi ke STM32	<i>Request Recipe</i>	1	0	26.87
STM32 ke Raspi	<i>Realtime Weight</i>	344	0	109.29

Berdasarkan **Tabel 4.6** format data JSON berhasil dikirimkan dari Raspi menuju STM32 dan STM32 berhasil membalas dengan format telemetri dengan latensi 26.87 ms dengan total paket yang dikirim adalah sejumlah 1 paket. Sedangkan rata rata latensi update berat dan status dari telemetri STM32 ke Raspi diperoleh sebesar 109.29 ms dengan total paket yang dikirim adalah sejumlah 344

paket. Bentuk payload yang dikirim maupun diterima ditampilkan pada serial monitor seperti pada **Gambar 4.9** berikut,

```
BENTUK PAKET DATA (PAYLOAD)
Data TX (Perintah ke STM32) - Ditemukan 1 variasi:
→ '{"chamber1": true, "cb1_weight": 5, "chamber2": true, "cb2_weight": 5, "chamber3": true, "cb3_weight": 4, "chamber4": true, "cb4_weight": 6, "porsi": 1, "status": "dspn"}\r\n'

Data RX (Balasan dari STM32) - Ditemukan 344 variasi:
→ '{"weight":17,"cbr1_Prog":false,"cbr2_Prog":false,"cbr3_Prog":false,"cbr4_Prog":false,"status":"DSPN"}'
→ '{"weight":46,"cbr1_Prog":true,"cbr2_Prog":true,"cbr3_Prog":true,"cbr4_Prog":false,"status":"DSPN"}'
→ '{"weight":11,"cbr1_Prog":true,"cbr2_Prog":true,"cbr3_Prog":false,"cbr4_Prog":false,"status":"DSPN"}'
→ '{"weight":48,"cbr1_Prog":true,"cbr2_Prog":false,"cbr3_Prog":false,"cbr4_Prog":false,"status":"DSPN"}'
→ '{"weight":16,"cbr1_Prog":true,"cbr2_Prog":true,"cbr3_Prog":true,"cbr4_Prog":false,"status":"DSPN"}'
```

Gambar 4. 9 Bentuk Payload JSON yang dikirim Raspi (TX) dan yang diterima Raspi (RX)

Berdasarkan hasil pengujian pada **Gambar 4.9**, proses komunikasi UART antara Raspberry Pi Zero 2W dan STM32F411CEU6 berhasil berjalan dengan baik pada arah pengiriman (*transmit*) maupun penerimaan (*receive*). Paket data yang dikirimkan Raspberry Pi menunjukkan bahwa pengguna memilih garam 5 gram, cabai bubuk 5 gram, merica 4 gram, dan ketumbar 6 gram dengan jumlah 1 porsi. Seluruh parameter tersebut berhasil dikemas dalam format JSON yang terdiri atas informasi aktivasi setiap chamber (chamber1–chamber4), target berat masing-masing material (cb1_weight–cb4_weight), nilai porsi, serta status proses (status). Setelah paket diterima, STM32 berhasil melakukan parsing data dan mengeksekusi proses dispensing sesuai urutan yang diberikan.

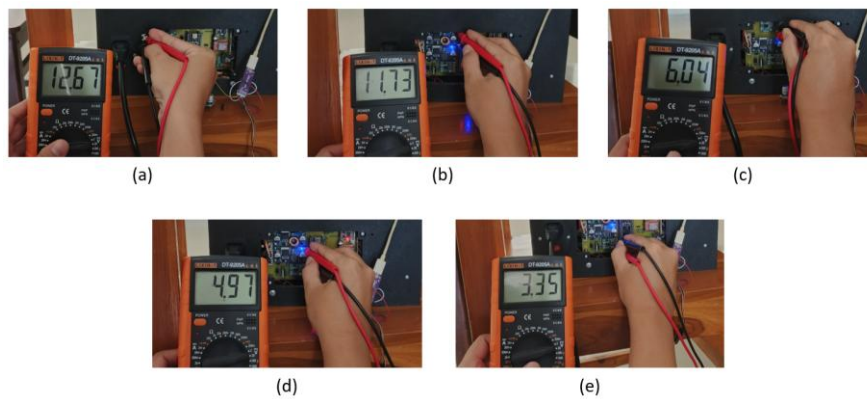
Pada arah komunikasi sebaliknya, STM32 secara berkala mengirimkan data telemetri menuju Raspberry Pi selama proses dispensing berlangsung. Data yang dikirimkan memuat informasi berat aktual hasil pembacaan loadcell (*weight*), status penyelesaian masing-masing chamber (*cbr1_Prog* hingga *cbr4_Prog*), serta status sistem (status). Perubahan nilai berat dari 17, 46, 11, hingga 48 (dalam satuan desigram atau setara 1,7 g; 4,6 g; 1,1 g; dan 4,8 g pada HMI) menunjukkan bahwa data berat berhasil diperbarui secara real-time sesuai proses keluarnya material. Selain itu, perubahan status *cbr1_Prog*, *cbr2_Prog*, *cbr3_Prog*, dan *cbr4_Prog* dari *false* menjadi *true* secara bertahap menandakan bahwa setiap chamber berhasil melaporkan penyelesaian proses dispensing sesuai urutan eksekusinya. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa mekanisme pertukaran data dua arah menggunakan format JSON melalui komunikasi UART telah berjalan dengan baik dan mampu mendukung sinkronisasi antara HMI pada Raspberry Pi dan proses kendali pada STM32 selama proses dispensing berlangsung.

4.6. Pengujian Perangkat Keras

Pengujian perangkat keras dilakukan untuk memastikan setiap komponen berjalan sesuai spesifikasi komponen. Sehingga sistem takar dan *dispensing* material bubuk dapat berjalan sebagaimana mestinya.

4.4.1. Pengujian Tegangan dan Arus Catu Daya

Sistem ini menggunakan catu daya 12 volt 5 ampere yang terhubung pada beberapa DC-DC *buck converter*. Diperoleh hasil pengukuran dengan menggunakan multimeter sebagai berikut.



Gambar 4. 10 a.) Hasil Ukur *Power Supply* 12volt. b.) Hasil Ukur XL4015 12volt. c.) Hasil Ukur MP1584 6volt. d.) Hasil Ukur LM2596 5volt. e.) Hasil Ukur MP1584 3.3volt.

Berdasarkan **Gambar 4.10**, hasil pengukuran menggunakan multimeter menunjukkan bahwa tegangan keluaran catu daya utama sebesar 12,67 V, sedangkan keluaran modul DC-DC *buck converter* XL4015, MP1584, LM2596, dan MP1584 masing-masing sebesar 11,73 V, 6,04 V, 4,97 V, dan 3,35 V. Nilai tegangan hasil pengukuran tersebut kemudian dibandingkan dengan tegangan kebutuhan masing-masing komponen untuk mengetahui tingkat penyimpangannya. Selanjutnya, data hasil pengukuran digunakan sebagai masukan dalam perhitungan *absolute error* dan *error* persentase menggunakan Persamaan (4.1) dan Persamaan (4.2), sehingga diperoleh tingkat akurasi tegangan keluaran dari setiap catu daya dan modul DC-DC *buck converter*.

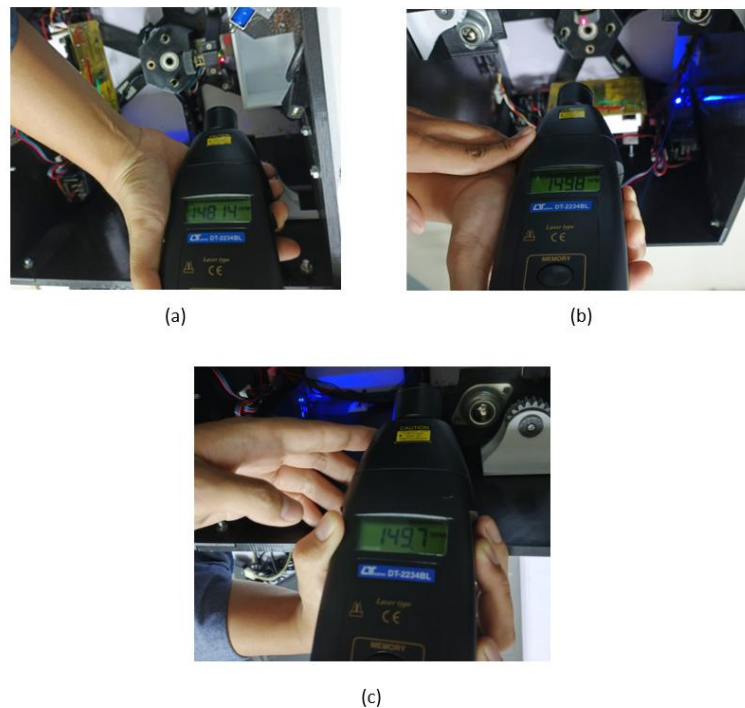
Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Tegangan Catu Daya dan DC-DC Converter

Komponen	Tegangan Kebutuhan (V)	Tegangan Terukur (V)	Absolute Error (V)	Error (%)
Power Supply	12.00	12.67	0.67	5.58
XL4015	12.00	11.73	0.27	2.25
MP1584	6.00	6.04	0.04	0.67
LM2596	5.00	4.97	0.03	0.60
MP1584	3.30	3.35	0.05	1.52

Berdasarkan hasil perhitungan pada **Tabel 4.7**, diperoleh bahwa *absolute error* terbesar terjadi pada catu daya 12 V, yaitu sebesar 0,67 V dengan *error* persentase sebesar 5,58%. Sementara itu, modul XL4015 menghasilkan *absolute error* sebesar 0,27 V dengan *error* 2,25%. Adapun modul MP1584 6 V, LM2596 5 V, dan MP1584 3,3 V masing-masing memiliki *absolute error* sebesar 0,04 V, 0,03 V, dan 0,05 V dengan *error* persentase berturut-turut sebesar 0,67%, 0,60%, dan 1,52%. Secara keseluruhan, seluruh modul DC-DC *buck converter* menghasilkan *error* persentase di bawah 3%, sedangkan catu daya utama memiliki *error* sebesar 5,58%. Nilai penyimpangan tersebut masih berada dalam batas yang dapat diterima sehingga tegangan keluaran dari catu daya dan setiap modul DC-DC dinilai cukup stabil serta mampu memenuhi kebutuhan tegangan komponen-komponen pada sistem.

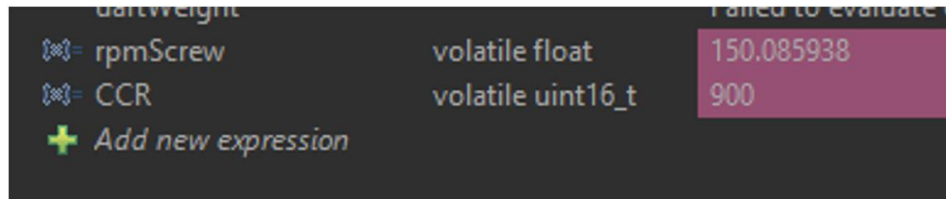
4.4.2. Pengujian Putaran Motor DC

Pengujian putaran motor DC dilakukan dengan mengukur putaran motor menggunakan alat ukur lalu dibandingkan dengan hasil pembacaan encoder. Hasil pembacaan *tachometer* dapat dilihat pada **Gambar 4.11**



Gambar 4. 11 a.) RPM Pada Shaft Motor. b.) RPM Pada Output Gearbox c.) RPM Pada Screwfeeder

Berdasarkan **Gambar 4.11(a)** hingga **Gambar 4.11(c)**, dilakukan pengujian untuk memverifikasi kecepatan putar pada setiap tahap mekanisme transmisi menggunakan *laser tachometer*. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa poros motor sebelum *gearbox* berputar sebesar 14.814 RPM, sedangkan poros keluaran *gearbox* yang terhubung dengan *spur gear* memiliki kecepatan sebesar 149,8 RPM. Nilai tersebut menunjukkan bahwa *gearbox* dengan rasio reduksi 1:100 bekerja sesuai dengan spesifikasinya, karena secara teoritis kecepatan keluaran yang diharapkan adalah sekitar 148,14 RPM ($14.814/100$). Selanjutnya, pengukuran pada poros *screw feeder* menghasilkan kecepatan sebesar 149,7 RPM. Perbedaan sebesar 0,1 RPM antara putaran keluaran *gearbox* dan *screw feeder* menunjukkan bahwa pasangan *spur gear* 16 gigi : 16 gigi memiliki rasio transmisi 1:1, sehingga tidak terjadi perubahan kecepatan putar yang signifikan pada mekanisme transmisi. Hasil pengujian ini membuktikan bahwa sistem mekanik yang dirancang mampu mentransmisikan putaran motor menuju *screw feeder* sesuai dengan perhitungan teoritis, sehingga kecepatan maksimum terbaca motor berada pada kisaran 150 RPM.



Gambar 4. 12 Hasil Pembacaan RPM Screwfeeder

Gambar 4.12(d) menunjukkan nilai kecepatan putar yang dihitung oleh mikrokontroler STM32 melalui pembacaan encoder menggunakan *Encoder Interface Mode*. Nilai yang ditampilkan pada *Live Expression* sebesar 150,08 RPM, sedangkan hasil pengukuran menggunakan laser tachometer pada *screw feeder* sebesar 149,7 RPM. Selisih kedua hasil pengukuran hanya sebesar 0,38 RPM atau sekitar 0,25% terhadap hasil pengukuran tachometer. Perbedaan yang sangat kecil tersebut menunjukkan bahwa metode perhitungan kecepatan menggunakan encoder dengan konstanta 2800 *pulse/revolution* telah mampu merepresentasikan kecepatan putar aktual motor secara akurat. Dengan demikian, nilai RPM yang digunakan sebagai umpan balik (*feedback*) pada pengendali Proportional-Integral (PI) dapat dipercaya untuk merepresentasikan kondisi putaran *screw feeder* selama proses dispensing berlangsung.

4.4.3. Pengujian Arus Motor DC

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui besarnya arus yang dikonsumsi motor DC *screw feeder* pada dua kondisi operasi, yaitu tanpa beban dan saat melakukan dispensing material bubuk. Hasil pengukuran arus menggunakan multimeter digital ditunjukkan pada **Gambar 4.12(a)** dan **Gambar 4.12(b)**.

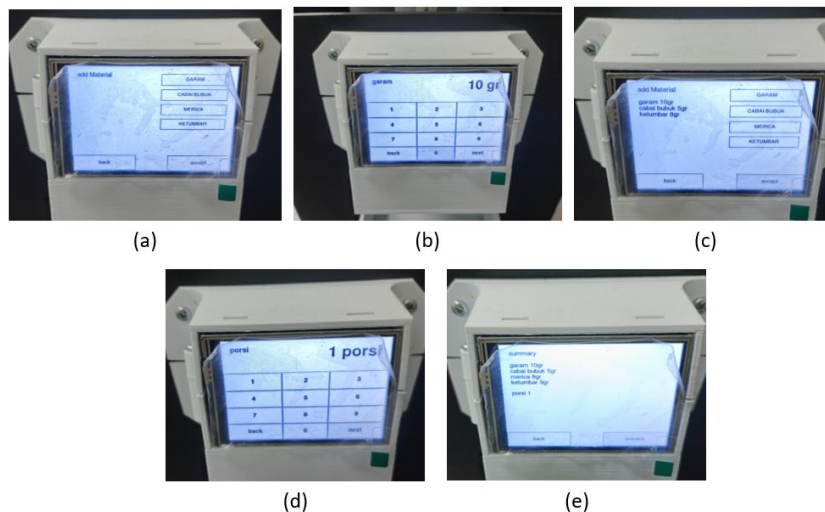


Gambar 4. 13 a.) Pengukuran Arus DC Motor tanpa material bubuk. **b.)** Pengukuran Arus DC Motor Dengan Material Bubuk

Berdasarkan **Gambar 4.13(a)**, arus yang dikonsumsi motor DC saat berputar tanpa material bubuk (*no-load*) sebesar 0,023 A. Ketika *chamber* diisi material bubuk dan motor melakukan proses dispensing, arus meningkat menjadi 0,049 A sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.13(b)**. Peningkatan arus sebesar 0,026 A menunjukkan adanya tambahan beban mekanis yang harus diatasi motor akibat gesekan antara material bubuk dengan mekanisme *screw feeder*. Meskipun demikian, nilai arus tersebut masih tergolong sangat kecil dibandingkan kapasitas catu daya (*power supply*) yang digunakan, yaitu 5 A. Pada kondisi beban maksimum yang diuji, motor hanya menggunakan sekitar 0,98% dari kapasitas arus catu daya, sehingga masih tersedia cadangan arus (*current headroom*) yang sangat besar untuk mendukung operasi sistem secara stabil. Dengan demikian, catu daya yang digunakan memiliki kapasitas yang lebih dari cukup untuk menyuplai kebutuhan motor dispenser beserta komponen elektronika lainnya tanpa mengalami penurunan tegangan (*voltage drop*) akibat kekurangan suplai arus selama proses dispensing berlangsung.

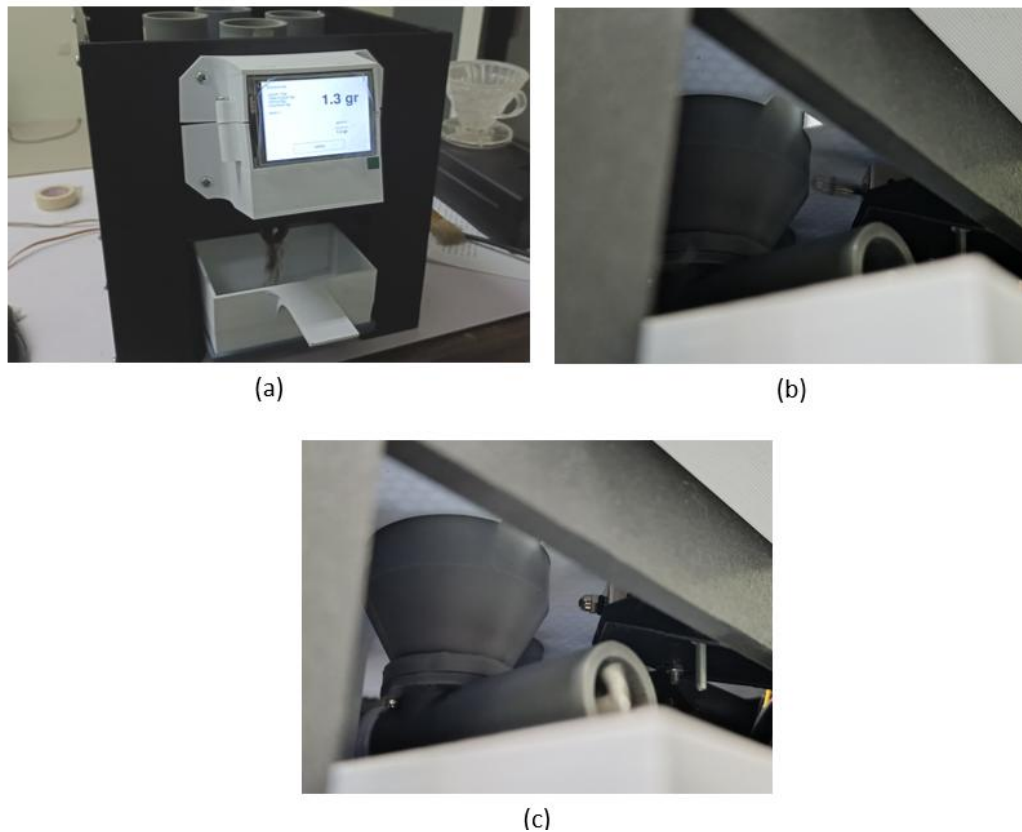
4.7. Integrasi Sistem

Pengujian integrasi sistem dilakukan dengan melakukan satu siklus dispensing material. Mulai dari pemilihan material beserta nilai berat nya, input nilai porsi, proses dispensing dan realtime monitoring, berpindah chamber, hingga halaman *done* yang menandakan selesainya siklus penimbangan. Pengujian ini dilakukan pemilihan material dan berat pada gram 10gr, cabai bubuk 5gr, merica 8gr, dan ketumbar 9gr. Sehingga total akhir material yang dihasilkan berada di angka 32 gram.



Gambar 4. 14 a.) Halaman Utama HMI. b.) halaman input berat c.) halaman Utama yang menyimpan nilai input. d.) halaman input porsi e.) halaman konfirmasi

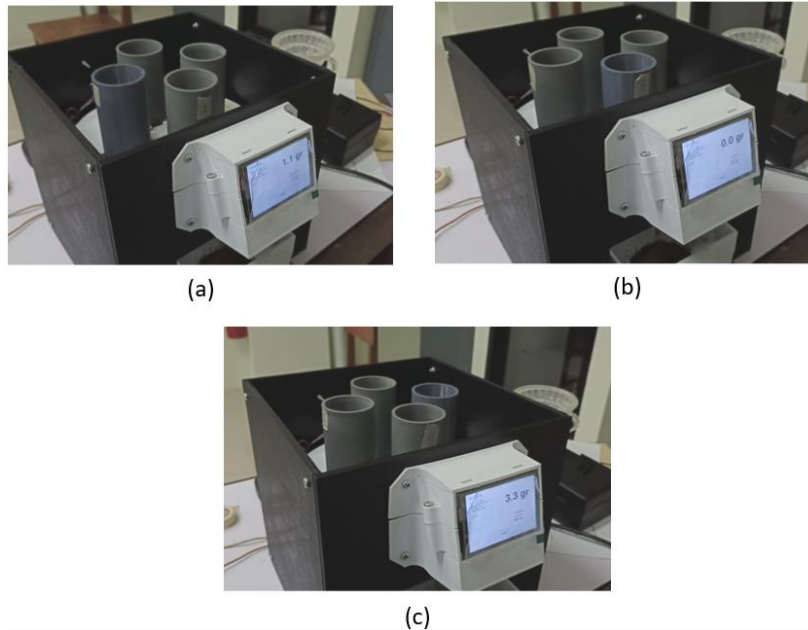
Hasil pengujian antarmuka pengguna ditunjukkan pada **Gambar 4.14(a)** hingga **Gambar 4.14(e)**. Berdasarkan hasil pengujian, setiap halaman pada *Human Machine Interface* (HMI) berhasil ditampilkan sesuai dengan rancangan yang telah dijelaskan. Gambar **4.14(a)** menunjukkan halaman utama yang berfungsi untuk memilih jenis material yang akan dikeluarkan. Setelah salah satu material dipilih, sistem berhasil menampilkan halaman input berat seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.14(b)**, sehingga pengguna dapat memasukkan nilai berat yang diinginkan melalui keypad pada layar sentuh. Nilai yang telah dimasukkan kemudian berhasil ditampilkan kembali pada halaman utama sebagai ringkasan material yang telah dipilih sebagaimana terlihat pada **Gambar 4.14(c)**. Selanjutnya, setelah seluruh material dipilih, sistem menampilkan halaman input porsi pada **Gambar 4.14(d)** untuk memasukkan jumlah porsi yang akan diproduksi. Setelah pengguna menekan tombol *Accept*, sistem berhasil menampilkan halaman konfirmasi pada **Gambar 4.14(e)** yang berisi daftar material, target berat masing-masing material, serta jumlah porsi sebelum proses dispensing dijalankan. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa perpindahan antarhalaman (*page navigation*), proses penerimaan masukan pengguna, serta penyajian informasi pada antarmuka telah berjalan sesuai dengan rancangan perangkat lunak yang telah dibuat. Setelah memasuki halaman konfirmasi, pengguna menekan tombol *procces* untuk memulai proses dispensing.



Gambar 4. 15 a.) Motor Dispenser Berhasil Mengeluarkan material Bubuk dan Realtime Monitoring, b) kondisi knocker ketika Bulk, c) Kondisi knocker ketika fine

Setelah pengguna menekan tombol process, ditunjukkan pada **Gambar 4.15(a)** hingga **Gambar 4.15(c)**, sistem berhasil berpindah secara otomatis dari halaman konfirmasi menuju halaman *realtime monitoring*, yang menampilkan berat aktual hasil pembacaan load cell selama proses dispensing berlangsung. Pada saat yang sama, STM32 mulai mengeksekusi urutan dispensing sesuai parameter yang diterima dari Raspberry Pi. Motor DC dispenser berhasil menggerakkan mekanisme *screw feeder* sehingga material bubuk dapat keluar dari *chamber* dan jatuh menuju wadah penampung (*tray*) sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.15(a)**. Nilai berat yang ditampilkan pada antarmuka juga berubah secara *real-time* mengikuti bertambahnya massa material yang diterima oleh load cell, sehingga pengguna dapat memantau proses penakaran secara langsung. Selain itu, solenoid *knocker* berhasil beroperasi selama tahap *bulk dispensing* untuk membantu mengurangi pemadatan material dan memperlancar aliran bumbi menuju *screw feeder*. Ketika sisa berat yang harus ditakar memasuki tahap *fine dispensing*, sistem secara otomatis menghentikan solenoid *knocker* sehingga laju keluaran material menjadi

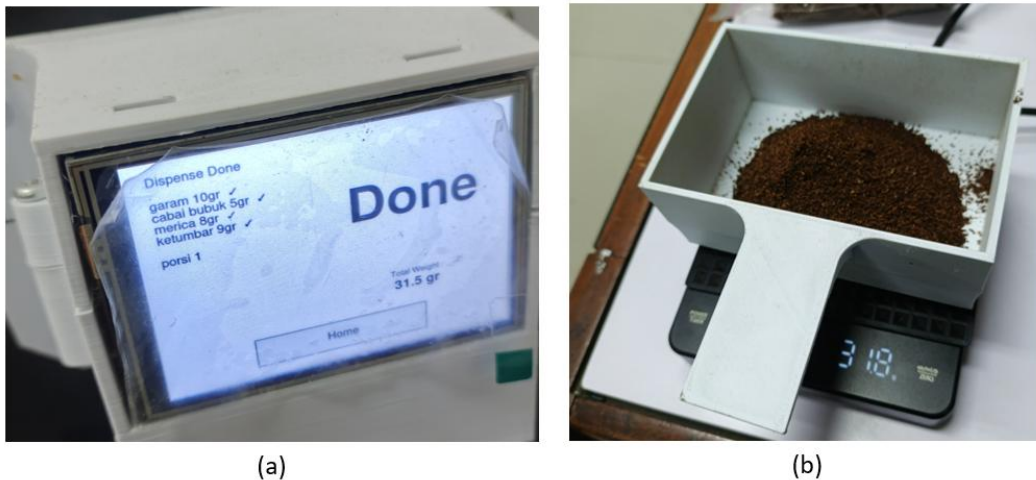
lebih kecil dan proses penakaran dapat dilakukan dengan lebih halus. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa integrasi antara antarmuka pengguna, komunikasi UART, aktuator dispenser, sensor load cell, dan strategi dispensing bertingkat (*bulk* dan *fine*) telah berjalan sesuai dengan rancangan sistem



Gambar 4. 16 a.) Berpindah ke chamber 2 b.) Berpindah ke chamber 3 c.) berpindah ke chamber 4

Setelah berat material pada *chamber* pertama mencapai nilai target, sistem secara otomatis menghentikan putaran motor dispenser dengan mengatur nilai PWM menjadi nol. Selanjutnya, motor stepper berhasil menggerakkan mekanisme pemutar *chamber* menuju posisi material berikutnya sesuai urutan yang telah dibentuk pada proses *sequence generation*. **Gambar 4.16(a)** menunjukkan bahwa sistem berhasil berpindah menuju *chamber* kedua untuk melakukan dispensing cabai bubuk, kemudian setelah target berat tercapai sistem kembali menghentikan motor dispenser dan melanjutkan rotasi menuju *chamber* ketiga sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.16(b)**. Proses yang sama kembali berlangsung hingga motor stepper berhasil memposisikan *chamber* keempat seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.16(c)**. Pada setiap perpindahan *chamber*, sistem terlebih dahulu melakukan proses *tare* pada load cell sehingga pembacaan berat dimulai kembali dari nol sebelum proses dispensing material berikutnya dilakukan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap *chamber* berhasil mengeluarkan material sesuai urutan

resep yang diberikan, kemudian menghentikan proses dispensing ketika berat target masing-masing material telah tercapai sebelum melanjutkan ke *chamber* berikutnya. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi antara mekanisme rotasi *chamber*, pembacaan load cell, serta algoritma *sequence dispensing* telah bekerja sesuai dengan rancangan sehingga proses penakaran beberapa jenis bumbu dapat dilakukan secara otomatis dalam satu siklus operasi.

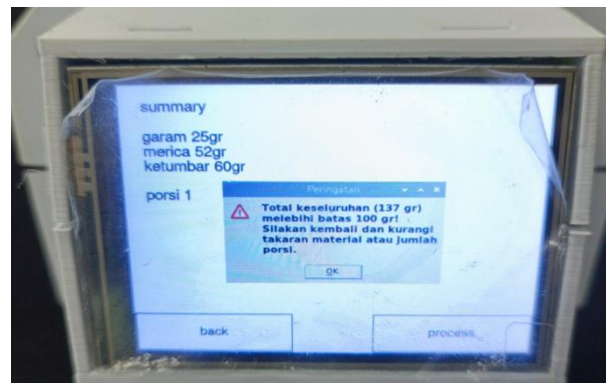


Gambar 4. 17 a.) HMI Masuk ke Halaman Done setelah Dispensing Selsesai **b.)** Hasil Penimbangan aktual pada timbangan digital

Setelah seluruh proses dispensing pada keempat *chamber* selesai dilaksanakan, STM32 mengirimkan status *DONE* kepada Raspberry Pi melalui komunikasi UART. Status tersebut kemudian diterjemahkan oleh antarmuka pengguna untuk berpindah secara otomatis menuju halaman *Done*, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.17(a)**. Pada halaman ini ditampilkan daftar material yang telah berhasil dikeluarkan beserta target berat masing-masing yang ditandai dengan simbol centang (✓), jumlah porsi yang diproses, serta total berat hasil dispensing sebesar 31,5 g. Untuk memverifikasi hasil penakaran, dilakukan pengukuran menggunakan timbangan digital eksternal sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.17(b)**. Hasil pengukuran menunjukkan berat akhir material sebesar 31,8 g, sedangkan target total yang diberikan pengguna adalah 32 g, sehingga diperoleh selisih sebesar 0,2 g atau *error* sekitar 0,63% terhadap berat referensi. Selisih antara pembacaan load cell pada sistem dan timbangan digital eksternal sebesar 0,3 g masih berada dalam batas toleransi pengukuran serta dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik sensor, resolusi alat ukur, dan proses pemindahan material

menuju wadah penampung. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa keseluruhan rangkaian proses, mulai dari penerimaan parameter pada HMI, komunikasi UART antara Raspberry Pi dan STM32, pembentukan *sequence*, proses dispensing pada setiap *chamber*, hingga penyelesaian siklus penakaran telah berjalan sesuai dengan rancangan sistem. Halaman *Done* juga berfungsi sebagai indikator bahwa seluruh proses telah selesai dieksekusi dan sistem siap digunakan kembali untuk siklus penakaran berikutnya setelah pengguna menekan tombol *Home*.

Selain pengujian pada kondisi normal, dilakukan pula pengujian terhadap mekanisme validasi masukan untuk memastikan sistem mampu mencegah proses dispensing apabila parameter yang dimasukkan melebihi kapasitas maksimum alat.



Gambar 4. 18 Tampilan Warning Ketika Input Material Lebih Dari 100gram

Hasil pengujian ditunjukkan pada **Gambar 4.18**, di mana pengguna memasukkan total target berat sebesar 137 g, yaitu melebihi batas maksimum sistem sebesar 100 g. Berdasarkan hasil pengujian, Raspberry Pi berhasil menghitung total berat seluruh material sebelum proses dispensing dijalankan dan menampilkan pesan peringatan (*warning*) yang menginformasikan bahwa total berat telah melampaui kapasitas sistem. Pada kondisi tersebut, sistem tidak mengizinkan pengguna melanjutkan ke halaman *Realtime Monitoring*, sehingga paket *recipe* tidak dikirimkan kepada STM32 dan proses dispensing tidak dieksekusi. Pengguna diarahkan untuk kembali mengurangi berat masing-masing material atau jumlah porsi hingga total berat berada dalam batas yang diizinkan. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa mekanisme validasi parameter pada antarmuka pengguna telah berfungsi sesuai rancangan sehingga mampu mencegah kesalahan operasi (*invalid input*) serta menghindari proses dispensing yang berpotensi melebihi kapasitas penimbangan sistem.