

Otomasi Sistem Weighing dan Kontrol Temperature untuk Pengaturan Kekentalan Lem Berbasis PID Auto Tuning

Satria Purnomo¹, Eko Budi Utomo², Himmawan Sabda Maulana³

^{1,2,3}Program Studi Sarjana Terapan Teknik Mekatronika, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

Jl. Raya ITS, Sukolilo, Surabaya 60111, Jawa Timur, Indonesia

satriapurnomo789@gmail.com, ekobudi_u@pens.ac.id, himmawan@pens.ac.id

Abstrak - Proses produksi lem pada industri papan bergelombang memerlukan keakuratan tinggi dalam penimbangan bahan baku dan kestabilan suhu pada proses mixing. Ketergantungan pada operator manusia menyebabkan inkonsistensi resep dan fluktuasi suhu yang berdampak langsung pada kekentalan lem yang dihasilkan. Penelitian sebelumnya pada sistem mixing termal umumnya masih terbatas pada lingkungan laboratorium atau validasi simulasi, sehingga terdapat kesenjangan pada implementasi nyata di lingkungan industri dengan integrasi penimbangan otomatis dan kendali suhu dalam satu platform PLC. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem otomasi berbasis PLC Fatek yang mengintegrasikan penimbangan otomatis menggunakan load cell, pengukuran level tangki menggunakan sensor tekanan, pengendalian suhu steam valve dengan algoritma PID gain scheduling, serta antarmuka HMI Weintek untuk pemantauan proses secara real-time, dan diujikan langsung di PT Surindo Teguh Gemilang 1. Pengujian kontrol suhu dilakukan pada volume batch 100 liter dengan setpoint 70°C menggunakan enam variasi parameter: kontrol P ($k_P=250$ dan $k_P=200$), kontrol PD ($k_P=200$, $t_D=20$ dan $t_D=50$), serta kontrol PI ($k_P=200$, $t_I=40$ dan $t_I=65$). Kontrol P $k_P=250$ menghasilkan overshoot 10°C (14,3%) dengan settling time 320 detik dan steady-state error 1°C. Kontrol PD $t_D=20$ mereduksi overshoot hingga 0% dengan settling time 160 detik namun steady-state error 1,5°C masih ada. Kontrol PI $k_P=200$ $t_I=65$ menghasilkan performa terbaik: overshoot 0%, steady-state error 0°C, dan settling time 200 detik pada setpoint 70°C. Sistem yang dibangun terbukti meningkatkan konsistensi kualitas produk dan mengurangi ketergantungan pada operator dalam proses produksi lem.

Kata Kunci - Otomasi Industri, PLC, Kontrol PID Auto-Tuning, Sistem Penimbangan, Kontrol Suhu.

Abstrak - The production of adhesive glue in the corrugated board industry requires high precision in raw material weighing and temperature stability during the mixing process. Dependence on manual operators leads to formula inconsistencies and temperature fluctuations that directly affect the viscosity of the resulting glue. Previous studies on thermal mixing systems have been largely limited to laboratory environments or simulation-based validation, leaving a gap in real industrial implementation that integrates automated weighing and temperature control within a single PLC platform. This study designs and implements a Fatek PLC-based automation system integrating automatic weighing using load cells, tank level measurement using pressure sensors, PID gain scheduling temperature control for a steam valve, and a Weintek HMI for real-time process monitoring, deployed at PT Surindo Teguh Gemilang 1. Temperature control testing was conducted at a 100-liter batch volume with a 70°C setpoint using six parameter variations: P control ($k_P=250$ and $k_P=200$), PD control ($k_P=200$, $t_D=20$ and $t_D=50$), and PI control

($k_P=200$, $t_I=40$ and $t_I=65$). P control at $k_P=250$ produced an overshoot of 10°C (14.3%) with a settling time of 320 seconds and steady-state error of 1°C. PD control at $t_D=20$ eliminated overshoot but retained a 1.5°C steady-state error with settling time of 160 seconds. PI control at $k_P=200$ and $t_I=65$ achieved the best performance: 0% overshoot, 0°C steady-state error, and 200-second settling time at the 70°C setpoint. The implemented system demonstrably improves product quality consistency and reduces operator dependency in the glue production process.

Keywords - Industrial Automation, PLC, PID Auto-Tuning Control, Weighing System, Temperature Control.

I. PENDAHULUAN

Industri papan bergelombang (corrugated board) sangat bergantung pada kualitas lem sebagai bahan pengikat utama. Kualitas lem dipengaruhi oleh dua faktor kritis: akurasi penimbangan bahan baku dan stabilitas suhu pada proses mixing [1]. Proses glue kitchen yang masih manual rentan terhadap human error yang berdampak pada inkonsistensi formula dan ketidakstabilan suhu [2].



Gbr. 1 Mesin Glue Kitchen PT Surindo Teguh Gemilang 1

Gambar 1 menunjukkan kondisi aktual mesin glue kitchen di PT Surindo Teguh Gemilang 1. Terlihat tangki mixing stainless steel berkapasitas 1000 liter, motor mixer di bagian atas, panel kontrol dengan HMI di sisi kanan, dan sistem perpipaan untuk distribusi bahan baku. Kondisi eksisting masih menggunakan proses semi-manual yang menjadi dasar pengembangan sistem otomasi pada penelitian ini.

Penggunaan Programmable Logic Controller (PLC) sebagai pengendali proses otomatisasi industri terbukti efektif meningkatkan akurasi dan repeatabilitas proses manufaktur [3]. Kontroler PID merupakan metode pengendalian suhu yang paling banyak digunakan karena kemampuannya menyeimbangkan respons transien dan akurasi steady-state [4]. Metode auto-tuning dikembangkan untuk mengotomatiskan proses optimasi parameter PID [5], [6].

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji otomatisasi sistem mixing termal dan pengendalian suhu berbasis PLC. Parra-Camacho et al. [7] mengembangkan sistem otomatisasi dan pengendalian proses mixing termal menggunakan DCS Honeywell HC900 dengan metodologi GEMMA-GRAFCET, menerapkan kontroler PI terdesentralisasi untuk pengendalian level dan suhu secara simultan pada sistem tangki multi-output (MIMO). Penelitian tersebut berhasil mencapai settling time pengendalian suhu sekitar 6.265 detik dengan respons overdamped dan overshoot di bawah 6% untuk pengendalian level, namun dilakukan pada skala laboratorium dengan sistem tangki berdiameter 60 cm tanpa integrasi penimbangan bahan baku otomatis. Mbeah dan Normanyo [8] mengotomatiskan batch mixer farmasi menggunakan PLC Siemens S7-300 dengan SCADA berbasis InTouch Wonderware, mengintegrasikan pengendalian suhu, agitasi, dan urutan penambahan bahan, namun validasinya dilakukan sepenuhnya melalui simulasi komputer tanpa pengujian pada plant nyata di lingkungan industri aktif. Pada sisi pengendalian suhu, Cui et al. [9] mengusulkan strategi PID berbasis integral gain scheduling untuk sistem suhu uap superheated pada unit pembangkit listrik 600 MW dan membuktikan eliminasi overshoot serta performa terbaik pada beban 100–50%, namun hasilnya juga berbasis simulasi MATLAB tanpa implementasi pada perangkat keras PLC industri. Ashtiani dan Ghandchi [4] serta Kuzishchin et al. [6] mengkaji pengendalian suhu berbasis PLC dengan pendekatan self-tuning dan predictor, namun keduanya berfokus pada single-loop tanpa integrasi sistem penimbangan batch.

Berdasarkan kajian tersebut, terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan: belum ada penelitian yang mengimplementasikan sistem otomatisasi terintegrasi yang menggabungkan penimbangan bahan baku otomatis berbasis load cell, pengukuran level tangki berbasis sensor tekanan, dan pengendalian suhu PID dengan gain scheduling secara bersamaan dalam satu platform PLC pada mesin glue kitchen industri papan bergelombang skala produksi nyata. Penelitian yang ada umumnya: (1) hanya menangani satu subsistem (penimbangan atau pengendalian suhu, bukan keduanya sekaligus), (2) dilakukan pada skala laboratorium atau melalui simulasi, atau (3) menggunakan platform DCS berharga tinggi yang tidak praktis untuk skala industri menengah. Penelitian ini bertujuan mengisi gap tersebut dengan merancang dan mengimplementasikan sistem otomatisasi terintegrasi pada mesin glue kitchen PT Surindo Teguh Gemilang 1, menggunakan PLC Fatek FBs-Series sebagai platform kendali, mencakup penimbangan otomatis (load cell), pengukuran level tangki (sensor tekanan), serta pengendalian suhu steam valve dengan

kontroler PID gain scheduling — dan divalidasi melalui pengujian langsung pada kondisi produksi industri aktual.

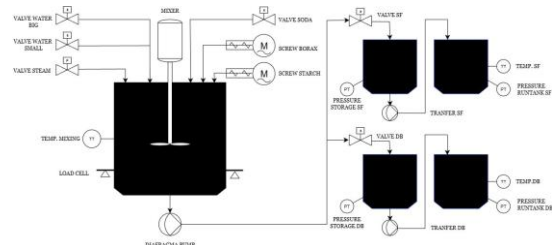
Antarmuka HMI berperan penting dalam pemantauan dan pengendalian proses secara real-time [10], sementara otomatisasi proses pencampuran termal terbukti meningkatkan konsistensi kualitas produk [7]. Sensor RTD PT100 banyak dipilih karena akurasi tinggi pada rentang suhu proses industri [11], sedangkan karakterisasi steam valve sebagai aktuator suhu perlu dilakukan cermat agar respons kontrol optimal [12]. Pendekatan gain scheduling pada kontroler PID memungkinkan penyesuaian parameter secara dinamis untuk proses non-linear [9], dengan landasan teori kontrol modern sebagai dasar perancangan dan analisisnya [13], [14].

Analisis respons transien dan gain scheduling merupakan pendekatan yang dibahas secara mendalam dalam teori kontrol modern sebagai dasar penyetelan parameter PID [13], [14]. Implementasi kontrol batch berbasis PLC pada industri farmasi membuktikan peningkatan presisi dosis serta reduksi waktu siklus [8]. Aspek keamanan sistem PLC perlu diperhatikan seiring integrasi dengan jaringan digital. Optimasi kualitas papan bergelombang dan bahan perekat juga terus menjadi perhatian dalam industri ini [15], sedangkan sensor load cell telah terbukti andal untuk pengukuran massa bahan baku secara akurat pada berbagai proses industri [16].

II. METODE PENELITIAN

A. Deskripsi Sistem dan P&ID

Sistem otomatisasi dirancang untuk proses mixing lem di glue kitchen pabrik corrugated box. Gambar 2 menunjukkan P&ID diagram keseluruhan sistem yang mencakup tangki mixing, sistem pengumpanan bahan (valve air, valve soda, screw borax, screw starch), steam valve untuk pemanasan, serta tangki penyimpanan SF dan DB dengan sensor tekanan dan suhu masing-masing.

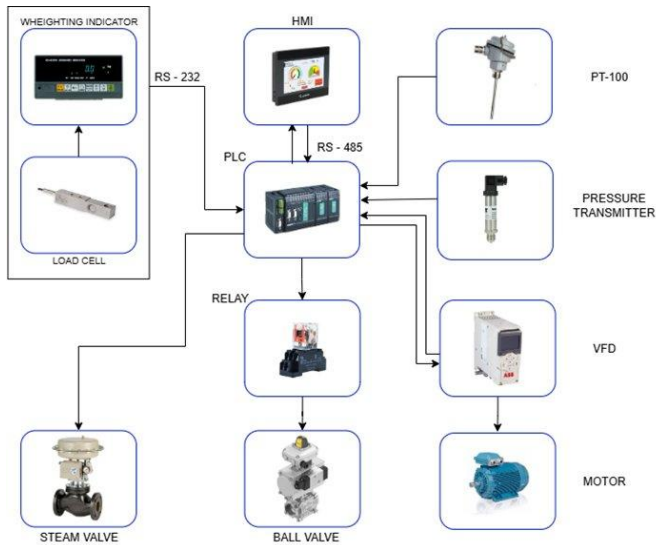


Gbr. 2 P&ID Diagram Sistem Glue Kitchen

Berdasarkan P&ID pada Gambar 2, aliran proses dimulai dari pengisian Air melalui Valve Water Big dan Valve Water Small ke dalam tangki mixing. Steam masuk melalui Valve Steam untuk proses pemanasan. Bahan baku tambahan seperti soda dimasukkan melalui Valve Soda, sedangkan Borax dan Starch diumpungkan menggunakan conveyor screw. Produk lem yang telah jadi dipindahkan ke tangki penyimpanan SF (Single Facer) dan DB (Double Backer) melalui diaphragm pump. Setiap tangki penyimpanan dilengkapi sensor tekanan (PT) untuk estimasi level dan sensor suhu (TT) untuk pemantauan kualitas lem.

B. Arsitektur Hardware

Gambar 3 menunjukkan arsitektur hardware sistem. PLC Fatek FBs-Series menjadi pusat kendali yang terhubung ke HMI melalui RS-485, ke weighing indicator melalui RS-232, serta ke sensor dan aktuator secara langsung.



Gbr. 3 Arsitektur Hardware Sistem

Komponen utama: PLC Fatek FBs-60MCT-AC, modul suhu FBs-6RTD, sensor RTD PT100 ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$), load cell 1 ton (3 unit), sensor tekanan, steam valve, VFD ABB untuk motor mixer, dan HMI Weintek 8102IP 10". Tangki mixing berkapasitas 1000 liter dilengkapi mixer untuk menjamin homogenitas campuran.

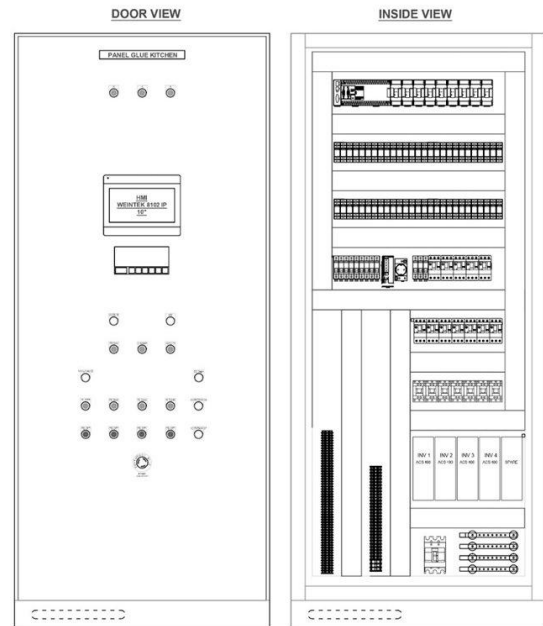
Komunikasi antara PLC dan HMI menggunakan protokol RS-485 yang memungkinkan pertukaran data real-time. Komunikasi antara PLC dan weighing indicator menggunakan RS-232 untuk pembacaan data penimbangan secara serial. Modul FBs-6RTD memungkinkan pembacaan hingga enam kanal sensor suhu RTD sekaligus, sehingga suhu di berbagai titik proses dapat dipantau secara bersamaan.

C. Desain Panel Kontrol

Gambar 4 menunjukkan desain layout panel glue kitchen, yang terdiri dari door view (tampak luar panel) dan inside view (tampak dalam panel). Panel ini menampung PLC Fatek, modul ekspansi, HMI Weintek 8102IP 10", VFD ABB, dan komponen pendukung lainnya dalam susunan terstruktur untuk memudahkan instalasi dan perawatan. Pada door view, HMI Weintek 8102IP 10" ditempatkan di bagian tengah atas panel untuk kemudahan akses operator, sedangkan lampu indikator dan selektor mode dipasang di sisi kanan. Pada inside view, PLC Fatek FBs-60MCT-AC beserta modul ekspansi FBs-6RTD dipasang pada DIN rail bagian atas, VFD ABB untuk motor mixer dipasang di bagian bawah dengan jarak termal yang memadai, serta terminal blok dan kabel daya disusun terpisah dari kabel sinyal untuk meminimalkan interferensi elektromagnetik pada pembacaan sensor RTD dan load cell.

Pemilihan enclosure panel juga mempertimbangkan rating IP yang sesuai dengan lingkungan produksi pabrik lem yang

memiliki kelembaban tinggi dan potensi paparan uap bahan kimia. Pengkabelan internal mengikuti standar wiring industri dengan pemberian label identitas pada setiap terminal, sehingga proses troubleshooting dan perawatan berkala dapat dilakukan dengan lebih cepat dan aman oleh teknisi lapangan.



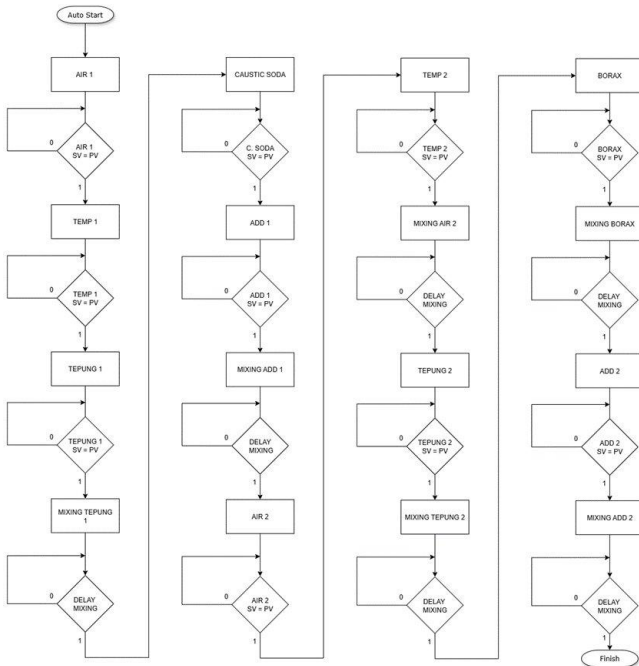
Gbr. 4 Desain Layout Panel Glue Kitchen

D. Flowchart Proses Otomasi

Perancangan alur proses otomasi dilakukan dengan memetakan seluruh tahapan mixing lem ke dalam diagram flowchart yang terstruktur. Flowchart ini menjadi acuan pemrograman PLC agar setiap aksi kontrol dapat dieksekusi secara berurutan dan konsisten. Gambar 5 menunjukkan flowchart proses otomatis (auto sequence) sistem secara lengkap. Proses dimulai dari penimbangan Air 1, pemanasan Temp 1, penambahan Tepung 1, dilanjutkan Caustic Soda, Air 2, Temp 2, Tepung 2, Borax, hingga proses mixing akhir. Setiap transisi antar tahap dikondisikan oleh pemenuhan setpoint penimbangan ($SV = PV$) maupun setpoint suhu, sehingga sistem tidak akan melanjutkan ke tahap berikutnya sebelum kondisi tersebut terpenuhi.

Berdasarkan flowchart pada Gambar 5, proses auto sequence terbagi menjadi empat kelompok tahapan berurutan. Kelompok pertama dimulai dari penimbangan Air 1, pemanasan Temp 1 hingga suhu target tercapai, kemudian penimbangan Tepung 1, proses mixing tepung, dan delay mixing. Kelompok kedua mencakup penimbangan Caustic Soda, penimbangan Add 1, mixing Add 1 beserta delay mixing, kemudian penimbangan Air 2. Kelompok ketiga melanjutkan dengan pemanasan Temp 2, mixing Air 2 beserta delay mixing, penimbangan Tepung 2, dan mixing Tepung 2 beserta delay mixing. Kelompok keempat merupakan tahap akhir yang terdiri dari penimbangan Borax, mixing Borax beserta delay mixing, penimbangan Add 2, mixing Add 2 beserta delay mixing, hingga proses selesai.

Nilai setpoint setiap tahap penimbangan dan suhu telah tersimpan sebagai data resep dalam memori PLC, sehingga operator cukup memilih nomor resep melalui HMI dan sistem menjalankan seluruh urutan secara otomatis tanpa perlu memasukkan ulang parameter di setiap batch produksi.



Gbr. 5 Flowchart Auto Sequence Proses Mixing Lem

Berdasarkan flowchart pada Gambar 5, setiap tahap penimbangan bahan menggunakan mekanisme perbandingan SV=PV (Set Value = Process Value). Sistem akan menunggu hingga bobot aktual (PV) yang terbaca load cell sama dengan setpoint bobot (SV) sebelum melanjutkan ke tahap berikutnya.

Demikian pula pada tahap pemanasan, sistem menunggu hingga suhu tangki mencapai setpoint Temp 1 maupun Temp 2 sebelum lanjut ke proses berikutnya. Setiap tahap mixing dilakukan dengan durasi delay yang telah diatur dalam resep PLC untuk memastikan homogenitas campuran sebelum bahan berikutnya ditambahkan.

Mekanisme kondisional berlapis ini baik berbasis bobot maupun suhu memastikan setiap bahan masuk pada kondisi yang tepat, mencegah reaksi kimia yang tidak diinginkan akibat urutan atau timing penambahan bahan yang keliru.

Urutan proses yang terstandarisasi ini menghilangkan variabilitas yang terjadi pada proses manual, di mana ketepatan waktu dan takaran sepenuhnya bergantung pada ketelitian operator. Dengan sistem auto sequence ini, konsistensi kualitas lem terjaga di setiap batch produksi dan ketergantungan pada keahlian individu operator dapat diminimalkan secara signifikan.

E. Perancangan Kontrol PID dengan Gain Scheduling

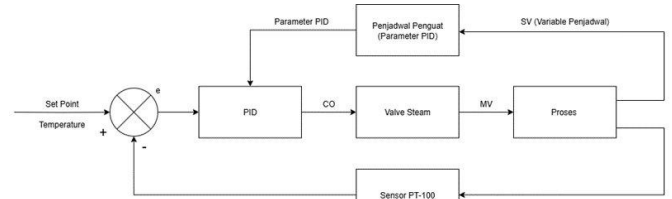
Gambar 6 menunjukkan diagram blok sistem kontrol PID dengan gain scheduling. Instruksi TPCTL pada PLC Fatek mengimplementasikan kontrol suhu berdasarkan algoritma PID standar dengan persamaan:

$$u(t) = Kp e^{(t)} + Ki \int_0^t e(r)dr + Kd \frac{de(t)}{dt}$$

dengan:

- $u(t)$: sinyal kendali ke aktuator
- $e(t)$: error, yaitu $e(t)=SP-PV$
- Kp : penguat proporsional
- Ki : penguat integral
- Kd : penguat derivatif

Untuk memvisualisasikan bagaimana parameter tersebut dikelola secara dinamis dalam sistem, diagram blok kontrol dengan mekanisme gain scheduling disajikan pada Gbr. 6.

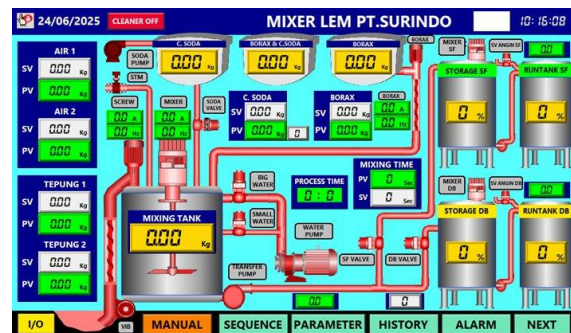


Gbr. 6 Diagram Blok PID dengan Gain Scheduling

Pada Gambar 6, blok Penjadwal Penguat (Gain Scheduler) menerima SV (variabel penjadwal) dan menghitung parameter PID yang sesuai secara otomatis. Pendekatan ini disebut gain scheduling karena parameter Kp , Ti , dan Td disesuaikan berdasarkan kondisi operasi yang berubah, misalnya saat suhu awal campuran berbeda akibat variasi suhu ambient atau volume batch. Output kontroler PID berupa sinyal CO (Control Output) yang mengatur bukaan steam valve sebagai manipulated variable (MV) untuk mengendalikan suhu mixing sebagai process variable.

F. Antarmuka HMI

Antarmuka HMI (Gambar 7) menampilkan status real-time seluruh komponen sistem: SV/PV penimbangan bahan, status tangki mixing, timer proses, dan kontrol mode (Manual/Sequence/Parameter/History/Alarm).



Gbr. 7 Tampilan Main Screen HMI Mixer Lem

Antarmuka HMI pada Gambar 7 dirancang dengan tampilan yang intuitif menggunakan representasi grafis tangki dan perpipaan (P&ID style). Operator dapat memantau SV (setpoint) dan PV (nilai aktual) penimbangan Air 1, Air 2, Tepung 1, Tepung 2 secara bersamaan. Sedangkan status storage tank SF dan DB ditunjukkan dalam persentase di bagian kanan. Tombol navigasi di bagian bawah memungkinkan

operator berpindah antara mode Manual, Sequence, Parameter, History, dan Alarm sesuai kebutuhan operasional.

G. Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan di PT Surindo Teguh Gemilang 1 pada 1 Oktober 2025. Tahapan: (1) continuity test dan I/O test, (2) scale testing dan kalibrasi load cell, (3) kalibrasi sensor tekanan dan suhu, (4) recipe test, (5) manual mixing test, (6) running test mode otomatis. Pengujian kontrol suhu pada volume batch 100 liter dengan setpoint 70°C menggunakan variasi parameter P, PD, dan PI sesuai Tabel I.

TABEL I
PARAMETER PERCOBAAN TUNING P, PD, DAN PI

No	Vol. Air	SP	kP	tI	tD
1	100 L	70°C	250	0	0
2	100 L	70°C	200	0	0
3	100 L	70°C	200	0	20
4	100 L	70°C	200	0	50
5	100 L	70°C	200	40	0
6	100 L	70°C	200	65	0

Kriteria keberhasilan pengujian ditentukan berdasarkan tiga indikator: (1) tidak terdapat steady-state error pada kondisi tunak, (2) overshoot tidak melebihi 5% dari setpoint ($\pm 3,5^\circ\text{C}$ dari 70°C), dan (3) settling time kurang dari 10 menit. Indikator-indikator tersebut ditetapkan mengacu pada standar proses industri pengolahan lem yang membutuhkan kestabilan suhu untuk menjaga viskositas produk sesuai kualitas lem yang diharapkan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Fungsional Sistem

TABEL II
REKAPITULASI PENGUJIAN SISTEM OTOMASI

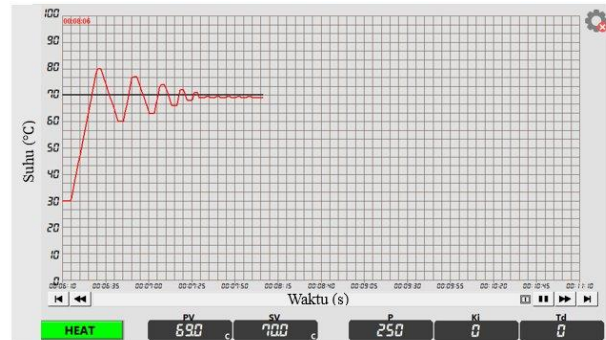
No	Jenis Pengujian	Tujuan	Hasil
1	Continuity Test	Verifikasi jalur kelistrikan	Semua jalur terhubung baik
2	Test I/O PLC	Verifikasi I/O PLC	Semua I/O berfungsi normal
3	Scale Testing	Akurasi penimbangan	Sesuai nilai referensi
4	Kalibrasi Sensor Tekanan	Estimasi level tangki	Pembacaan stabil & konsisten
5	Pengujian Sensor Suhu	Akurasi suhu	PT100 bekerja normal
6	Recipe Test	Verifikasi data resep HMI	Data dieksekusi sesuai input
7	Manual Mixing Test	Pengujian mode manual	Berjalan tanpa gangguan
8	Running Test Auto	Pengujian mode otomatis	Berjalan tanpa gangguan

Seluruh delapan tahapan pengujian fungsional menunjukkan hasil sesuai perancangan. Continuity test mengonfirmasi integritas jalur kelistrikan, uji I/O memverifikasi seluruh sinyal, scale testing menghasilkan

akurasi sesuai referensi, dan seluruh mode operasi berjalan tanpa gangguan.

B. Analisis Respons Kontrol P

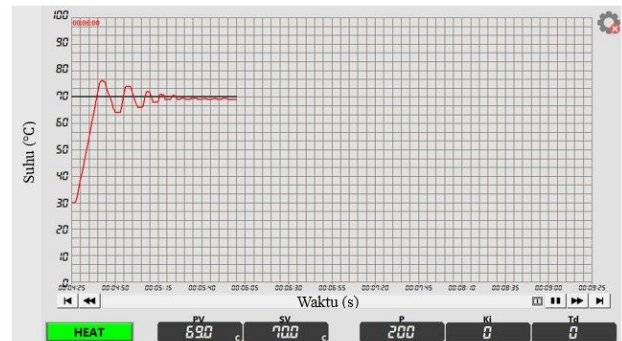
Kontrol P murni dengan $kP=250$ (Gbr. 8) menunjukkan respons awal cepat namun menghasilkan hunting di sekitar setpoint.



Gbr. 8 Respons Kontrol P=250

Pada Gambar 8 terlihat suhu naik dengan sangat cepat dari sekitar 30°C dan melampaui setpoint 70°C dengan overshoot yang signifikan hingga hampir 80°C. Osilasi berlanjut selama beberapa menit sebelum akhirnya menstabil di sekitar setpoint. Perilaku ini disebabkan oleh nilai kP yang terlalu besar sehingga steam valve membuka terlalu lebar saat error masih besar, mengakibatkan pemasukan panas yang berlebihan.

Selanjutnya dilakukan pengujian dengan menurunkan nilai penguatan proporsional menjadi $kP=200$ untuk mengevaluasi pengaruh reduksi kP terhadap karakteristik respons. Gambar 9 menampilkan hasil pengujian kontrol P dengan $kP=200$.



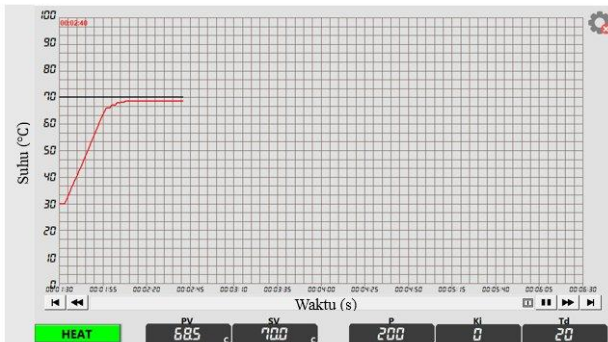
Gbr. 9 Respons Kontrol P=200

Penurunan kP menjadi 200 (Gbr. 9) mengurangi osilasi namun steady-state error tetap ada keterbatasan inheren kontrol P murni yang tidak memiliki mekanisme koreksi offset jangka panjang.

Gambar 9 memperlihatkan perbaikan yang nyata dibandingkan $kP=250$. Amplitudo overshoot berkurang dan osilasi meredam lebih cepat. Namun sistem masih tidak dapat mencapai setpoint 70°C secara tepat karena tidak adanya aksi integral. Suhu akhir stabil di sekitar 69°C dengan steady-state error sekitar 1°C, yang dalam aplikasi industri dapat mempengaruhi viskositas lem secara kumulatif dalam jangka panjang.

C. Analisis Respons Kontrol PD

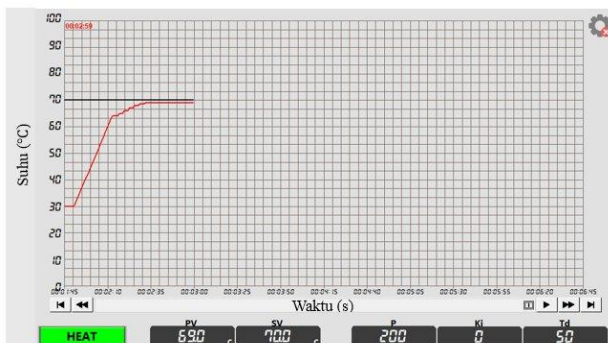
Pada sub-bab ini dilakukan analisis terhadap dua konfigurasi kontrol PD, yaitu dengan penguatan derivatif $tD=20$ dan $tD=50$. Kedua konfigurasi diuji pada kondisi yang sama: volume batch 100 liter, setpoint suhu 70°C , dan nilai $kP=200$.



Gbr. 10 Respons Kontrol PD ($P=200$, $D=20$)

Pada Gambar 10, kontrol PD dengan $tD=20$ menunjukkan respons yang lebih teredam dibandingkan kontrol P murni. Aksi derivatif mendeteksi laju perubahan error dan memberikan koreksi awal sehingga overshoot berkurang. Grafik menunjukkan suhu naik secara halus mendekati 70°C dengan osilasi kecil di sekitar setpoint sebelum menstabil.

Selanjutnya dilakukan pengujian dengan menambah nilai $tD = 50$ pada (Gbr. 11).



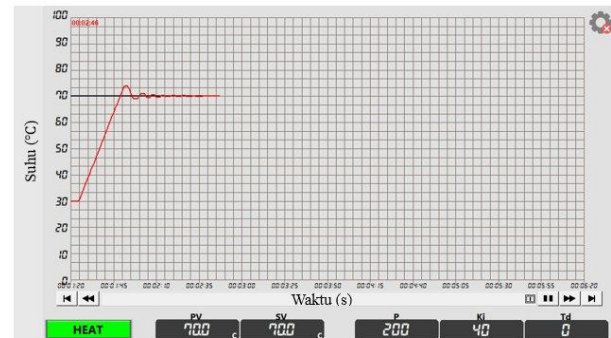
Gbr. 11 Respons Kontrol PD ($P=200$, $D=50$)

Penambahan aksi derivatif ($tD=20$ dan $tD=50$) memperbaiki karakteristik transien secara signifikan. Kontrol PD $tD=20$ (Gbr. 10) menghasilkan osilasi lebih kecil dengan respons lebih cepat, sedangkan $tD=50$ (Gbr. 11) menghasilkan respons lebih halus namun settling time lebih lambat. Namun steady-state error tetap ada karena tidak adanya aksi integral.

D. Analisis Respons Kontrol PI

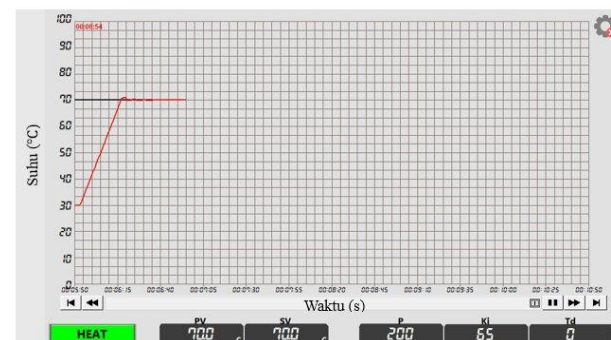
Pada sub-bab ini dilakukan analisis terhadap dua konfigurasi kontrol PI, yaitu dengan waktu integral $tI=40$ dan $tI=65$. Berbeda dengan kontrol P dan PD yang hanya merespons besaran dan laju perubahan error, aksi integral bekerja dengan mengakumulasi error sepanjang waktu. Akumulasi ini menghasilkan sinyal koreksi tambahan yang terus mendorong proses variable mendekati setpoint hingga error benar-benar nol.

Dengan demikian, penambahan aksi integral bertujuan untuk menghilangkan steady-state error yang tidak dapat diatasi oleh kontrol P maupun PD, sekaligus mengevaluasi pengaruh nilai tI terhadap kecepatan respons dan kemungkinan terjadinya overshoot.



Gbr. 12 Respons Kontrol PI ($P=200$, $I=40$)

Gambar 12 memperlihatkan bahwa dengan $tI=40$, aksi integral berhasil menghilangkan steady-state error sehingga suhu akhir tepat pada 70°C . Terdapat overshoot kecil pada fase transien awal yang disebabkan oleh akumulasi integral yang cukup agresif. Setelah overshoot, suhu kembali turun dan menstabil tepat di setpoint dalam waktu sekitar 3-4 menit.



Gbr. 13 Respons Kontrol PI ($P=200$, $I=65$)

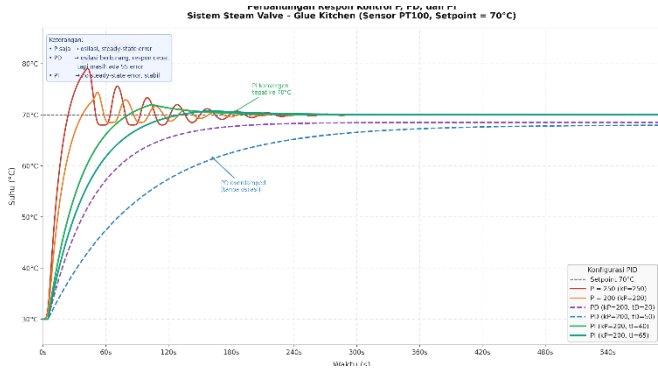
Gambar 13 menunjukkan konfigurasi terbaik yang dicapai dalam penelitian ini. Dengan $tI=65$ yang lebih besar, akumulasi integral terjadi lebih lambat sehingga overshoot hampir tidak terdeteksi. Suhu naik secara monotonik dari 30°C menuju setpoint 70°C dan menstabil tanpa osilasi. Waktu settling sekitar 6-7 menit dianggap masih dalam batas yang dapat diterima untuk proses batch mixing yang berlangsung puluhan menit.

Kontrol PI berhasil menghilangkan steady-state error. Konfigurasi $tI=40$ (Gbr. 12) mencapai setpoint 70°C dengan sedikit overshoot, sedangkan $tI=65$ (Gbr. 13) menghasilkan respons lebih halus dengan osilasi mendekati nol. Aksi integral mengakumulasi error sehingga koreksi offset terjadi secara bertahap hingga suhu tepat pada setpoint.

E. Perbandingan dan Pemilihan Parameter Optimal

Gambar 14 merangkum seluruh respons dari keenam konfigurasi kontrol yang telah diuji dalam satu grafik perbandingan. Visualisasi ini memudahkan analisis komparatif

terhadap karakteristik overshoot, settling time, dan steady-state error masing-masing konfigurasi.



Gbr. 14 Perbandingan Respons Kontrol P, PD, dan PI

Gambar 14 menunjukkan perbandingan keenam konfigurasi secara bersamaan. Kontrol P menghasilkan overshoot tertinggi akibat keterbatasan inheren proporsional murni, kontrol PD mengeliminasi overshoot namun menyisakan steady-state error karena tidak ada akumulasi integral, sedangkan kontrol PI $tI=65$ terbukti paling optimal dengan respons monoton dan presisi pada setpoint 70°C . Perbandingan kuantitatif seluruh konfigurasi disajikan pada Tabel III.

TABEL III

PERBANDINGAN PERFORMA KONTROL P, PD, DAN PI

No	SP	kP	tI/tD	Overshoot	Settling	SS Error
1	70°C	250	$tD=0$	10°C (14,3%)	320 detik	1°C
2	70°C	200	$tD=0$	5°C (7,1%)	300 detik	1°C
3	70°C	200	$tD=20$	0%	160 detik	$1,5^{\circ}\text{C}$
4	70°C	200	$tD=50$	0%	179 detik	1°C
5	70°C	200	$tI=40$	$1,5^{\circ}\text{C}$ (2,1%)	166 detik	0°C
6	70°C	200	$tI=65$	0%	200 detik	0°C

Berdasarkan Tabel III, konfigurasi PI dengan $kP=200$ dan $tI=65$ dipilih sebagai parameter optimal karena satu-satunya konfigurasi yang secara simultan memenuhi ketiga kriteria keberhasilan: overshoot 0% (di bawah batas 5%), steady-state error 0°C , dan settling time 200 detik (di bawah batas 10 menit). Pemilihan $tI=65$ dibandingkan $tI=40$ mencerminkan trade-off antara kecepatan eliminasi offset dan risiko integral windup: nilai tI lebih besar memperlambat akumulasi integral sehingga proses mendekati setpoint lebih halus, yang kritis pada sistem termal berinersia besar seperti tangki mixing 1000 liter. Implikasi praktisnya, stabilitas suhu pada setpoint 70°C menjamin konsistensi viskositas lem di setiap batch dan meminimalkan kemungkinan reject produk.

Perbandingan dengan penelitian terdahulu memperkuat posisi hasil penelitian ini secara objektif. Parra-Camacho et al. [7] mengimplementasikan sistem otomasi mixing termal menggunakan DCS Honeywell HC900 dengan kontroler PI terdesentralisasi dan memperoleh settling time pengendalian suhu sekitar 6.265 detik dengan respons overdamped. Penelitian ini menghasilkan settling time 200 detik dengan konfigurasi PI $tI=65$ sekitar 31 kali lebih cepat. Perbedaan ini

secara teknis dapat dijelaskan oleh dua faktor: kapasitas termal sistem batch lem (100 liter) yang jauh lebih kecil dibandingkan sistem tangki laboratorium pada referensi tersebut, serta steam valve yang memiliki respons aktuasi lebih langsung dan presisi tinggi dibandingkan aktuatur aliran air panas. Mbeah dan Normanyo [8] mengotomasi batch mixer farmasi berbasis PLC Siemens S7-300 dengan validasi melalui simulasi komputer, memperoleh variasi rata-rata di bawah 5% dan koefisien korelasi 95%.

Berbeda dengan penelitian tersebut yang sepenuhnya berbasis simulasi, penelitian ini divalidasi melalui pengujian langsung di lingkungan industri aktif pada mesin kapasitas 1000 liter sehingga hasil yang diperoleh mencerminkan kondisi nyata termasuk gangguan proses seperti variasi suhu awal bahan baku dan fluktuasi tekanan steam. Aspek validasi pada plant nyata ini menjadi keunggulan metodologi penelitian ini dibandingkan pendekatan berbasis simulasi. Cui et al. [11] mengusulkan strategi PID berbasis integral gain scheduling pada sistem suhu uap superheated 600 MW dan membuktikan eliminasi overshoot serta steady-state error nol, namun hasil tersebut diperoleh melalui simulasi MATLAB tanpa implementasi perangkat keras. Penelitian ini mencapai hasil yang setara eliminasi overshoot dan steady-state error nol dengan menerapkan gain scheduling langsung pada instruksi TPCTL PLC Fatek FBs, membuktikan bahwa pendekatan ini feasible pada platform PLC skala industri menengah tanpa memerlukan model matematis yang kompleks. Keterbatasan penelitian ini adalah pengujian hanya dilakukan pada satu setpoint (70°C) dan satu volume batch (100 liter), sehingga robustness parameter PI $tI=65$ pada kondisi setpoint dan volume yang berbeda masih perlu diverifikasi lebih lanjut.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Sistem otomasi proses mixing lem berbasis PLC Fatek FBs-60MCT-AC berhasil dirancang dan diimplementasikan di PT Surindo Teguh Gemilang 1, mengintegrasikan tiga subsistem dalam satu platform: penimbangan otomatis menggunakan tiga load cell 1 ton dengan komunikasi RS-232 ke weighing indicator, pengukuran level tangki penyimpanan SF dan DB menggunakan sensor tekanan, serta pengendalian suhu steam valve dengan kontroler PID gain scheduling melalui instruksi TPCTL pada modul FBs-6RTD.

Kontribusi utama penelitian ini adalah tiga hal: (1) rancangan sistem otomasi terintegrasi yang menggabungkan subsistem penimbangan, pengukuran level, dan kendali suhu dalam satu platform PLC sebuah integrasi yang belum ditemukan pada penelitian sejenis di lingkungan glue kitchen industri papan bergelombang; (2) validasi langsung pada kondisi produksi industri aktual (bukan simulasi), sehingga hasil yang diperoleh mencerminkan performa nyata termasuk gangguan proses seperti fluktuasi suhu awal dan variasi tekanan steam; dan (3) pembuktian bahwa pendekatan gain scheduling berbasis transient response dapat diimplementasikan secara efektif pada platform PLC kelas menengah (Fatek FBs-Series) tanpa memerlukan model matematis sistem yang kompleks.

Seluruh delapan tahapan pengujian fungsional memenuhi spesifikasi perancangan. Pada pengujian kontrol suhu, kontrol P $k_P=250$ menghasilkan overshoot 10°C (14,3%) dan steady-state error 1°C ; kontrol PD $t_D=20$ mereduksi overshoot hingga 0% namun menyisakan steady-state error $1,5^\circ\text{C}$; sedangkan kontrol PI $k_P=200$ $t_I=65$ mencapai performa optimal dengan overshoot 0%, steady-state error 0°C , dan settling time 200 detik pada setpoint 70°C membuktikan efektivitas gain scheduling pada platform PLC industri.

Untuk pengembangan selanjutnya disarankan: (1) Pengujian performa kontroler PI $t_I=65$ pada variasi setpoint suhu (60°C , 65°C , dan 75°C) dan variasi volume batch (200 liter dan 500 liter) guna mengevaluasi robustness parameter gain scheduling terhadap perubahan kondisi operasi dengan metrik IAE (Integral Absolute Error) sebagai indikator kuantitatif utama; (2) Pengembangan dan perbandingan langsung antara kontroler PI gain scheduling yang telah diimplementasikan dengan kontroler fuzzy-PID atau Model Predictive Control (MPC) menggunakan metrik settling time, overshoot, dan IAE pada kondisi identik, untuk menentukan apakah peningkatan kompleksitas algoritma memberikan keunggulan performa yang signifikan pada proses ini; (3) Implementasi sistem identifikasi model proses otomatis berbasis metode step response (FOPDT atau SOPDT) yang berjalan di latar belakang setiap awal batch, sehingga parameter gain scheduling dapat diperbarui secara adaptif tanpa intervensi teknisi ketika terjadi perubahan jenis formula lem atau kapasitas tangki; (4) Integrasi sistem monitoring Industrial IoT berbasis protokol OPC-UA atau MQTT untuk transmisi data suhu, bobot, dan riwayat batch ke server pusat secara real-time, memungkinkan analisis tren kualitas produksi dan deteksi dini anomali proses melalui dashboard berbasis web yang dapat diakses oleh supervisor produksi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Pereira, A. S. L. Neves, F. J. G. Silva, R. Godina, L. Morgado, and G. F. L. Pinto, "Production process analysis and improvement of corrugated cardboard industry," *Procedia Manuf.*, vol. 51, no. 2020, pp. 1395–1402, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.194.
- [2] V. Kumar Verma, A. Agrawal, R. Chaudhary, A. Chauhan, P. Sharma, and A. Yadav, "Automatic corrugated box making line," *Mater. Today Proc.*, vol. 79, pp. 260–266, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.11.116.
- [3] J. Y. Chen, K. C. Tai, and G. C. Chen, "Application of Programmable Logic Controller to Build-up an Intelligent Industry 4.0 Platform," *Procedia CIRP*, vol. 63, pp. 150–155, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.116.
- [4] A. R. Ashtiani and M. Ghandchi, "A Novel Self-tuning Zone PID Controller for Temperature Control via a PLC code," vol. 5, no. 19, pp. 61–68, 2016.
- [5] C. Wiharya, H. Sungkowo, A. S. Suryandari, and B. I. Kurniawan, "Design and optimization of digitalization device of temperature control system using PID Ziegler-Nichols control in chemical engineering laboratory," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1073, no. 1, p. 012051, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1073/1/012051.
- [6] V. F. Kuzishchin, E. I. Merzlikina, and V. V. Hoang, "PID-controller with predictor and auto-tuning algorithm: study of efficiency for thermal plants," *Therm. Eng.*, vol. 64, no. 9, pp. 694–702, 2017, doi: 10.1134/S0040601517090051.
- [7] L. C. Parra-Camacho, A. F. Rodriguez-Bayona, and J. J. Carreno-Zagarra, "Automation and control of the thermal mixing process," *Syst. Sci. Control Eng.*, vol. 11, no. 1, 2023, doi: 10.1080/21642583.2023.2177769.
- [8] A. Mbeah and E. Normanyo, "Automation of a Pharmaceutical Batch Mixer Using Programmable Logic Controller (PLC) and Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA)," *Autom. Control Intell. Syst.*, vol. 12, no. 4, pp. 71–107, 2024, doi: 10.11648/j.acis.20241204.11.
- [9] X. Cui *et al.*, "PID Control of a Superheated Steam Temperature System Based on Integral Gain Scheduling," *Energies*, vol. 15, no. 23, pp. 1–16, 2022, doi: 10.3390/en15238978.
- [10] D. Mourtzis, J. Angelopoulos, and N. Panopoulos, "The Future of the Human – Machine Interface (HMI) in Society 5 . 0," 2023.
- [11] H. Li, "Pt100 temperature measurement sensors design and transducer simulation," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2897, no. 1, 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2897/1/012011.
- [12] M. Agrež, J. Avsec, and D. Strušnik, "Entropy and exergy analysis of steam passing through an inlet steam turbine control valve assembly using artificial neural networks," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 156, 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119897.
- [13] R. D. Setiawan and S. Bapak, *Setiawan, Iwan. "Kontrol PID untuk Proses Industri". Jakarta: PT. Media Komputindo, 2008.* 2008.
- [14] P. N. Paraskevopoulos, *Modern control engineering.* 2017. doi: 10.1201/9781315214573.
- [15] R. Fitas, H. J. Schaffrath, and S. Schabel, "A Review of Optimization for Corrugated Boards," *Sustain.*, vol. 15, no. 21, 2023, doi: 10.3390/su152115588.
- [16] M. F. Ajizi, D. Syauqy, M. Hannats, and H. Ichsan, "Klasifikasi Kematangan Buah Pisang Berbasis Sensor Warna Dan Sensor Load Cell Menggunakan Metode Naive Bayes," *J. Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 3, no. 3, pp. 2472–2479, 2019.