

Optimalisasi Auto Dosing Cement Additive Berbasis PLC-SCADA dengan Kendali Closed-Loop pada Finish Mill

^{1*} Affan Bachri, ² Moch. Syafi Uddin, ³ Eko Wahyu Santoso, ⁴ Abd Kadir Mahamad

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam Lamongan, Lamongan, Jawa Timur, Indonesia

⁴ Faculty Teknik Elektro dan Elektronika, Universiti Tun Husein Onn Malaysia, Batu Pahat, Malaysia

¹ affanbachri@unisla.ac.id, ² syafiuddin123@gmail.com, ³ Ekowahyu.santoso@unisla.ac.id, ⁴ kadir@uthm.edu.my

Article Info

Article history:

Received: 26 January 2026

Revised: 2 Maret 2026

Accepted: 22 April 2026

Keyword:

PLC

Closed-Loop Control

SCADA

Cement Additive

ABSTRACT

Programmable Logic Controller (PLC) is a microprocessor-based control system widely used in industrial automation for monitoring and controlling production processes. This technology has been applied in various sectors, including the cement industry. However, the implementation of PLC, SCADA, and closed-loop control in adaptive auto dosing systems for cement additives, particularly in finish mill processes, remains limited. In addition, dosing systems in the cement industry generally rely on operator intervention, making them less responsive to real-time process variations. Therefore, this study proposes a modification of an auto dosing cement additive system based on PLC–SCADA integration with a closed-loop control approach to improve process accuracy and stability. The system is designed to automatically adjust to changes in feed material and provide real-time monitoring. System performance was evaluated by comparing flow rate accuracy and stability before and after implementation. The results show that the proposed system reduces the error between the setpoint and the actual flow rate from 16% to less than 3%, decreases flow fluctuations, and improves process stability. Furthermore, the system enables centralized monitoring and reduces operator dependency, thereby enhancing operational efficiency in the finish mill process.

This is an open access article under the CC BY-SA license



DOI: <https://doi.org/10.32492/nucleus.v5i1.5110>

Corresponding Author:

Affan Bachri,

Teknik Elektro, Universitas Islam Lamongan,

Jl. Veteran No.53A, Jetis, Lamongan, Jawa Timur.

Email: affanbachri@unisla.ac.id

Abstrak— Programmable Logic Controller (PLC) merupakan sistem kontrol berbasis mikroprosesor yang umum digunakan dalam otomasi industri untuk pengawasan dan pengendalian proses produksi. Teknologi ini telah diterapkan dalam berbagai bidang, termasuk industri semen. Namun, penerapan PLC, SCADA, dan sistem kendali tertutup pada sistem auto dosing cement additive yang adaptif terhadap perubahan feed material, khususnya pada proses finish mill, masih terbatas. Selain itu, sistem dosing di industri semen umumnya masih bergantung pada operator sehingga kurang responsif terhadap perubahan kondisi proses secara real-time. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan modifikasi sistem auto dosing cement additive berbasis integrasi PLC–SCADA dengan penerapan kendali closed-loop untuk meningkatkan akurasi dan stabilitas proses. Sistem dirancang untuk mampu melakukan penyesuaian secara otomatis terhadap perubahan feed material serta menyediakan monitoring secara real-time. Evaluasi kinerja dilakukan dengan

membandingkan akurasi dan kestabilan laju aliran sebelum dan sesudah implementasi sistem. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan mampu menurunkan nilai error antara setpoint dan pembacaan aktual laju aliran dari 16% menjadi kurang dari 3%, mengurangi fluktuasi aliran additive, serta meningkatkan kestabilan proses. Selain itu, sistem memungkinkan monitoring terpusat dan mengurangi ketergantungan terhadap operator, sehingga meningkatkan efisiensi operasional pada proses finish mill.

I. Pendahuluan

Industri semen memiliki peranan strategis dalam pembangunan infrastruktur nasional sehingga setiap proses produksinya dituntut untuk memiliki stabilitas kualitas dan efisiensi yang tinggi [1], [2]. PT Semen Gresik sebagai bagian dari SIG Group menerapkan berbagai upaya peningkatan mutu melalui optimalisasi proses produksi, penguatan Quality Assurance Factor (QAF), serta efisiensi penggunaan bahan pendukung produksi seperti cement additive. Upaya tersebut dilakukan untuk menjaga konsistensi kualitas produk sekaligus meningkatkan efisiensi operasional di tengah persaingan industri semen yang semakin kompetitif.

Di finish mill, cement additive berfungsi untuk meningkatkan performa proses penggilingan serta membantu pencapaian mutu semen sesuai dengan standar yang ditetapkan [3], [4]. Namun, berdasarkan data operasional, penggunaan cement additive masih menunjukkan deviasi rata-rata sebesar 16% terhadap nilai setpoint. Kondisi ini berdampak pada ketidakstabilan operasional dan penggunaan bahan baku yang tidak efisien. Permasalahan tersebut umumnya disebabkan oleh sistem dosing yang masih bersifat manual dan sangat bergantung pada operator, sehingga respons terhadap perubahan kondisi proses menjadi kurang optimal. Selain itu, keterbatasan dalam monitoring secara real-time menyebabkan proses pengendalian tidak dapat dilakukan secara cepat dan akurat. Kondisi ini menegaskan pentingnya penerapan sistem kontrol otomatis yang mampu memberikan injeksi additive secara konsisten berdasarkan kondisi aktual proses.

Seiring dengan perkembangan teknologi otomasi industri, penerapan teknologi otomasi melalui PLC dan SCADA telah menjadi standar dalam meningkatkan keandalan serta presisi pengendalian proses di industri modern [5]–[8]. Dalam penelitian ini, integrasi tersebut dioptimalkan menggunakan metode kendali tertutup (closed-loop) dengan algoritma Proportional-Integral (PI). Pemilihan metode PI didasarkan pada karakteristik sistem laju aliran (flow control) yang cenderung fluktuatif, di mana aksi Integral berperan penting dalam mengeliminasi steady-state error, sementara peniadaan aksi Derivative dilakukan untuk menghindari sensitivitas berlebih terhadap noise frekuensi tinggi pada sensor aliran [9], [10]. Pendekatan ini memungkinkan sistem memantau output secara kontinu dan menyesuaikan input secara otomatis guna menghasilkan respons yang stabil dan konsisten [11], [12].

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa penerapan PLC, SCADA, dan metode kendali PI mampu meningkatkan akurasi, stabilitas, dan efisiensi sistem kontrol industri, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada pengendalian variabel proses umum seperti suhu, tekanan, dan kecepatan [13], [14]. Penelitian-penelitian tersebut umumnya belum secara spesifik mengkaji pengendalian laju aliran cement additive pada proses finish mill yang memiliki karakteristik dinamis dan dipengaruhi oleh fluktuasi feed material. Selain itu, sebagian besar sistem yang dikembangkan belum mengintegrasikan mekanisme penyesuaian setpoint secara real-time berbasis kondisi aktual proses. Akibatnya, permasalahan deviasi dosing pada sistem yang bersifat dinamis masih belum terselesaikan secara optimal. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada pengembangan sistem auto dosing cement additive berbasis PLC–SCADA dengan kendali tertutup yang mampu beradaptasi terhadap perubahan feed material secara real-time untuk meningkatkan akurasi dan kestabilan proses. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan pengendalian konvensional belum mampu mengakomodasi dinamika proses dosing yang dipengaruhi oleh fluktuasi feed material secara real-time.

Berdasarkan permasalahan dan kajian literatur tersebut, penelitian ini memiliki beberapa kontribusi utama, yaitu:

- (1) Pengembangan sistem auto dosing cement additive berbasis integrasi PLC–SCADA pada unit finish mill untuk pengendalian laju aliran yang dinamis mengikuti fluktuasi feed material.
- (2) Penerapan kendali tertutup berbasis PI untuk meningkatkan akurasi dan stabilitas laju aliran.
- (3) Evaluasi kinerja sistem dalam merespons perubahan feed material secara real-time.

Kontribusi ini diharapkan dapat memberikan solusi yang lebih adaptif dibandingkan sistem dosing konvensional pada industri semen.

II. Metode Penelitian

A. Metode

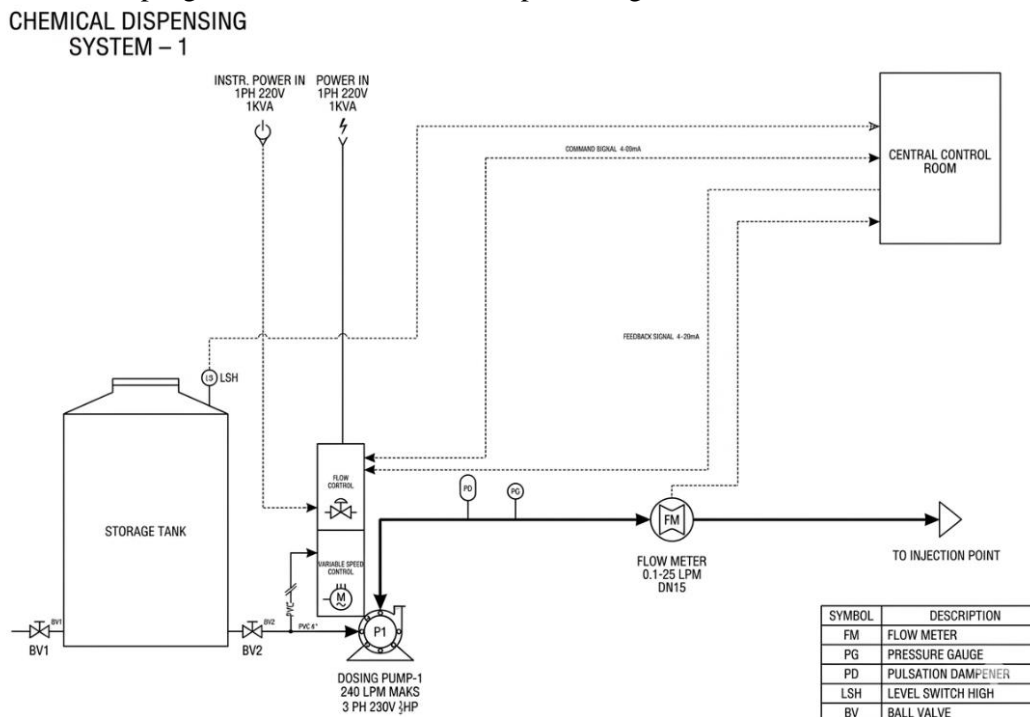
Metode penelitian ini mencakup beberapa tahapan, mulai dari perancangan sistem, implementasi sistem, hingga pengujian dan evaluasi sistem. Penelitian ini dilakukan di area Finish Mill PT. Semen Gresik Pabrik Rembang pada periode Januari–Maret 2026.

B. Perancangan Sistem

Tahap ini dilakukan untuk merancang arsitektur sistem kontrol berbasis PLC yang terintegrasi dengan SCADA dan Motor Control Center (MCC). Sistem dirancang menggunakan konsep kendali tertutup (closed-loop) dengan metode PI, di mana nilai aktual laju aliran cement additive yang dibaca oleh sensor dibandingkan dengan setpoint untuk menghasilkan error sebagai dasar pengendalian. Variabel penelitian meliputi nilai setpoint, laju aliran aktual, serta parameter kontrol (K_p dan K_i), sedangkan variabel gangguan berupa fluktuasi feed material.

(1) P&ID Diagram (Piping & Instrumentation Diagram)

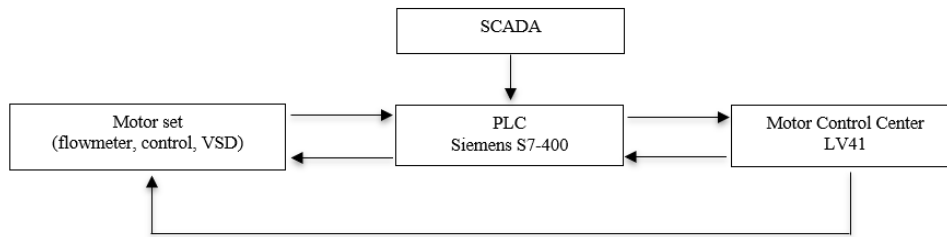
P&ID diagram merupakan diagram yang menggambarkan hubungan antara peralatan proses, sistem perpipaan, serta instrumen kontrol dalam suatu sistem. Pada penelitian ini, P&ID digunakan untuk menunjukkan aliran proses serta sebagai dasar dalam mengidentifikasi hubungan antar komponen dan menentukan titik pengukuran serta aktuasi dalam perancangan sistem kontrol.



Gambar 1. P&ID Diagram

(2) Diagram Blok Rangkaian

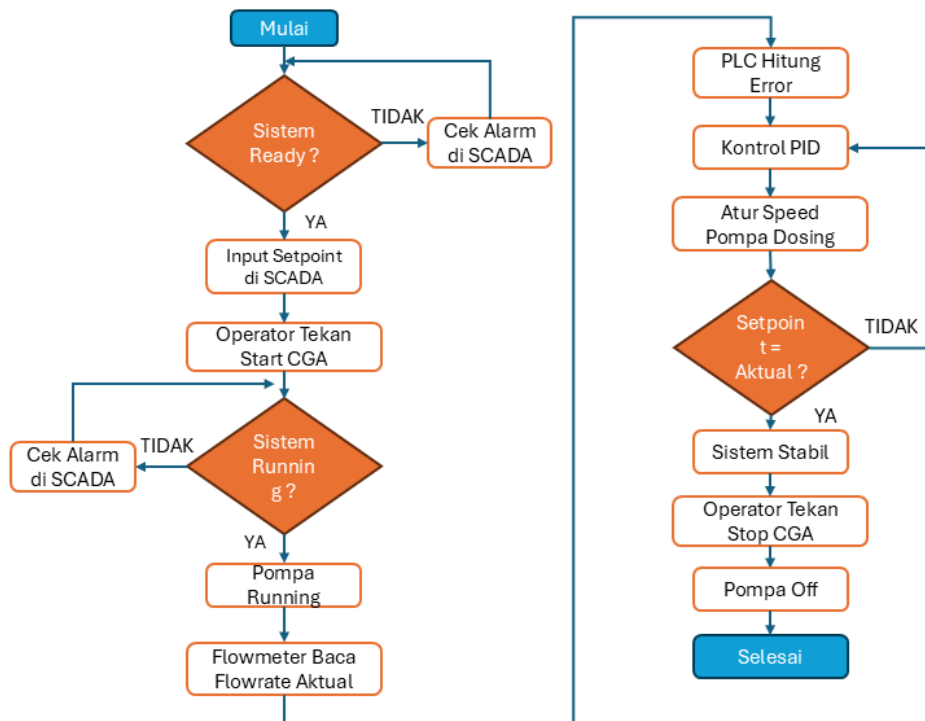
Diagram blok rangkaian merupakan representasi sistem yang menunjukkan hubungan antar komponen utama dalam bentuk blok. Pada penelitian ini, diagram blok digunakan untuk menggambarkan alur kerja sistem mulai dari input (sensor), proses pengolahan oleh PLC sebagai kontroler, hingga output (aktuator), serta mekanisme umpan balik (feedback) dalam sistem kendali tertutup. Diagram ini digunakan sebagai dasar dalam menganalisis aliran sinyal dan interaksi antar komponen dalam sistem kontrol.



Gambar 2. Diagram Blok Rangkaian

(3) Proses Kerja Sistem

Flowchart proses digunakan untuk menggambarkan alur kerja sistem secara sistematis dalam bentuk diagram alir. Pada penelitian ini, flowchart digunakan sebagai dasar dalam merepresentasikan urutan proses operasi sistem serta logika pengendalian yang diimplementasikan pada PLC.

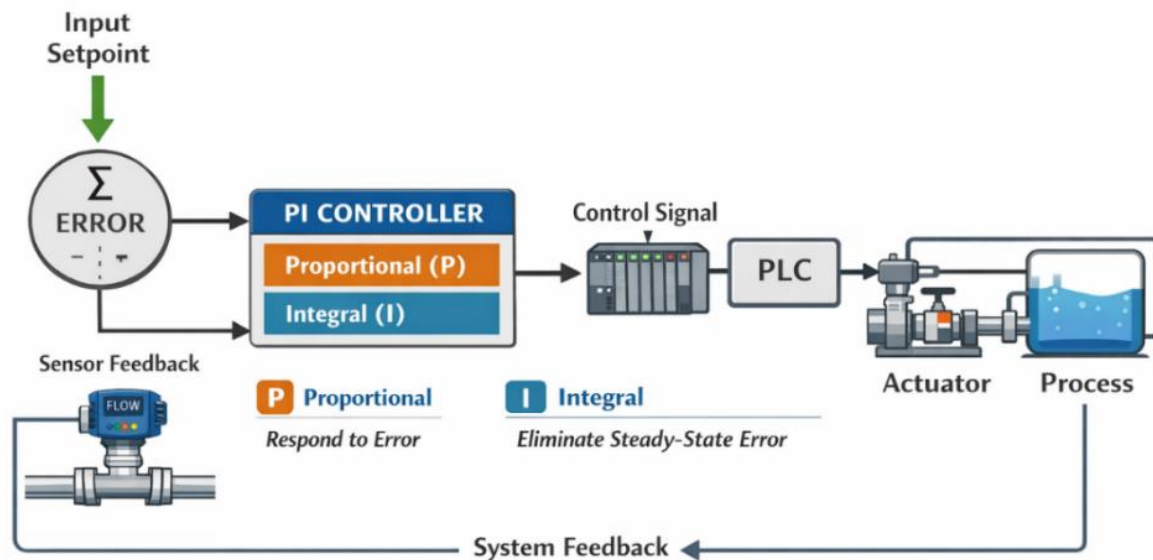


Gambar 3. Flowchart Proses Kerja Sistem

(4) Perancangan Sistem Kontrol

Sistem kontrol yang digunakan adalah kendali tertutup (closed-loop) berbasis PI (Proportional-Integral), yang diimplementasikan pada PLC. Komponen derivative (D) tidak digunakan karena memiliki sensitivitas tinggi terhadap noise pada sinyal sensor, khususnya pada pengukuran laju aliran yang bersifat fluktuatif [15], [16]. Secara teoritis, aksi derivative bergantung pada laju perubahan error terhadap waktu, sehingga noise berfrekuensi tinggi dapat teramplifikasi dan menyebabkan sinyal kendali menjadi tidak stabil [17]. Selain itu, keterbatasan resolusi sensor serta waktu sampling pada sistem berbasis PLC dapat mengurangi akurasi perhitungan turunan dan berpotensi menimbulkan osilasi pada aktuator.

Oleh karena itu, kontrol PI dipilih karena lebih robust terhadap noise, lebih mudah dituning, serta mampu mengeliminasi steady-state error tanpa menimbulkan fluktuasi berlebih.



Gambar 4. Diagram Blok Sistem Kontrol

C. Implementasi Sistem

Tahap implementasi meliputi pemasangan dan integrasi perangkat keras utama, yaitu PLC Siemens SIMATIC S7-400 sebagai pengendali utama, sistem MCC menggunakan Siemens SIMOCODE pro C (LV41 series), serta sistem dosing menggunakan pompa dosing dan flowmeter SEKO Elektra dengan rentang pengukuran 0–2000 ml/min. Sistem SCADA yang digunakan adalah ECS/OPStation V7.9. Arsitektur komunikasi sistem dirancang menggunakan kombinasi jaringan fieldbus, jaringan industri berbasis Ethernet, serta koneksi hardwired untuk menjamin keandalan dan kecepatan respons sistem. Komunikasi antara PLC dan MCC dilakukan menggunakan protokol Profibus-DP dengan kecepatan komunikasi sebesar 1,5 Mbps, sehingga memungkinkan pertukaran data secara real-time untuk pengendalian motor serta pemantauan status peralatan.

Selanjutnya, komunikasi antara PLC dan sistem SCADA dilakukan melalui jaringan Ethernet industri, yang mendukung proses monitoring, pengendalian, dan pencatatan data (data logging) secara terpusat dan real-time [18], [19]. Sistem SCADA digunakan untuk visualisasi parameter proses seperti setpoint, nilai aktual laju aliran, serta sinyal kendali [20]. Adapun komunikasi antara PLC dan sistem pompa dosing dilakukan secara hardwired menggunakan sinyal analog dan digital. Sinyal analog (4–20 mA) digunakan untuk merepresentasikan nilai laju aliran yang dibaca oleh flowmeter, sedangkan sinyal digital digunakan untuk pengendalian aktuator seperti start/stop pompa. Pendekatan ini dipilih untuk meminimalkan delay komunikasi serta meningkatkan keandalan sistem dalam pengendalian proses secara langsung.

PLC diprogram untuk mengolah data secara real-time. Parameter kontrol yang diperoleh dari proses tuning diintegrasikan ke dalam program PLC untuk menghasilkan sinyal kendali dalam pengaturan aktuator pada sistem dosing, sehingga sistem mampu merespons perubahan kondisi proses secara stabil, meminimalkan error terhadap setpoint, serta menjaga kestabilan laju aliran cement additive selama operasi berlangsung.

D. Metode Tuning Controller (PI)

Penentuan parameter kontrol PI dilakukan menggunakan metode tuning eksperimental dengan pendekatan trial and error terarah. Metode ini digunakan karena sistem yang dikembangkan merupakan sistem industri (plant-based system) pada unit finish mill, di mana proses berjalan secara kontinu (online process), sehingga tidak memungkinkan dilakukan identifikasi model matematis secara lengkap tanpa mengganggu kontinuitas operasi produksi. Selain itu, sistem memiliki karakteristik dinamis, non-linear, serta dipengaruhi oleh fluktuasi feed material sebagaimana telah dijelaskan pada bagian pendahuluan, yang menyebabkan terjadinya deviasi laju aliran cement additive rata-rata sebesar 16% pada sistem eksisting. Kondisi tersebut menjadikan pendekatan berbasis model kurang representatif terhadap kondisi aktual di lapangan, sehingga diperlukan metode tuning berbasis respons sistem secara langsung.

Proses tuning diawali dengan penetapan nilai awal parameter, yaitu $K_p = 0,1$ dan $K_i = 5 s$, sebagai kondisi awal pengujian. Parameter proporsional K_p kemudian ditingkatkan secara bertahap dengan increment 0,1 hingga sistem menunjukkan respons yang semakin cepat terhadap perubahan setpoint. Nilai K_p optimal ditentukan pada kondisi sistem mulai menunjukkan kecenderungan osilasi teredam dengan amplitudo sekitar 50% dari nilai setpoint, yang mengindikasikan bahwa sistem berada pada batas stabilitas operasional. Setelah parameter K_p diperoleh, parameter integral K_i dilakukan dengan increment waktu integral sebesar 5 detik. Penyesuaian ini bertujuan untuk mengeliminasi steady-state error yang muncul akibat dinamika proses aliran yang lambat serta adanya noise pengukuran pada sistem flowmeter. Pemilihan increment 5 detik didasarkan pada pertimbangan karakteristik proses industri, di mana aksi integral yang terlalu agresif dapat memicu akumulasi error berlebih serta meningkatkan risiko osilasi pada sistem. Secara umum, penentuan K_i juga mengacu pada pendekatan berbasis konstanta waktu proses, sehingga respons sistem tetap stabil dan tidak menimbulkan overshoot berlebih. Proses tuning dievaluasi menggunakan beberapa parameter performa, yaitu rise time, settling time, overshoot maksimum, serta steady-state error. Selain itu, sistem juga diuji terhadap gangguan berupa fluktuasi feed material untuk menguji robustnes dan kemampuan adaptasi sistem secara real-time.

Sebagai batas kinerja sistem, ditetapkan bahwa rise time maksimum adalah 180 detik (3 menit). Batas ini ditetapkan berdasarkan kebutuhan operasional industri, di mana sistem harus mampu mencapai kondisi tunak dalam waktu tidak lebih dari 3 menit agar tidak mengganggu kontinuitas proses produksi dan tetap menjaga stabilitas operasi. Parameter akhir dipilih apabila sistem memenuhi kondisi tersebut, yaitu mencapai setpoint dengan cepat, stabil, memiliki error minimal, serta tanpa osilasi berkelanjutan.

E. Metode Kalibrasi Flowmeter

Kalibrasi flowmeter dilakukan secara periodik untuk memastikan akurasi pengukuran laju aliran cement additive. Proses kalibrasi dilakukan setiap satu hari sekali dengan metode verifikasi volumetrik. Prosedur kalibrasi dilakukan dengan menjalankan sistem pada nilai setpoint sebesar 1000 ml/min. Fluida additive dialirkan melalui jalur bypass yang telah disediakan menuju gelas ukur selama interval waktu 1 menit. Volume aktual yang tertampung kemudian dibandingkan dengan nilai teoritis berdasarkan setpoint yang diberikan. Selisih antara nilai aktual dan nilai setpoint digunakan untuk menghitung nilai error pengukuran. Nilai error tersebut dibandingkan dengan batas toleransi yang mengacu pada standar internal, yaitu maksimum sebesar 3%. Apabila nilai error masih berada dalam batas toleransi, maka flowmeter dinyatakan layak digunakan. Namun, apabila nilai error melebihi batas toleransi, maka dilakukan penyesuaian (koreksi) terhadap parameter pembacaan flowmeter atau sistem kontrol untuk meningkatkan akurasi pengukuran.

F. Pengujian dan Evaluasi Sistem

Pengujian dan evaluasi sistem dilakukan untuk menilai kinerja sistem kontrol berdasarkan parameter akurasi, respons, dan kestabilan terhadap perubahan kondisi operasi. Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai setpoint dan nilai aktual laju aliran untuk menghitung nilai error, serta mengamati respons sistem terhadap fluktuasi feed material guna mengevaluasi kemampuan adaptasi secara real-time. Selanjutnya, evaluasi dilakukan melalui perbandingan kinerja sistem sebelum dan sesudah implementasi kontrol otomatis, dengan parameter yang dianalisis meliputi nilai error terhadap setpoint, tingkat fluktuasi laju aliran, kestabilan sistem, serta efisiensi penggunaan cement additive.

III. Hasil dan Pembahasan

Perhitungan Setpoint Flow Additive

Perhitungan setpoint laju aliran (flow) cement additive dilakukan berdasarkan kebutuhan dosis terhadap laju feed material pada unit Finish Mill. Parameter yang digunakan dalam perhitungan meliputi feed material, dosis additive, serta specific gravity (SG) dari additive. Nilai SG cement additive ditetapkan sebesar 1,1 kg/L, yang menunjukkan bahwa 1 liter additive memiliki massa 1,1 kg. Nilai dosis ditentukan berdasarkan jenis semen yang akan di produksi, yaitu 350 ppm untuk OPC dan 400 ppm untuk PCC. Perhitungan setpoint flow dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$Flow (ml/min) = \frac{Feed (t/h) \times Dosis (ppm)}{60 \times SG (kg/L)} \quad (1)$$

Keterangan:

Feed = laju umpan material (t/h)

Dosis = kebutuhan additive (ppm)

SG = specific gravity additive (kg/L)

Tabel 1. Setpoint Flow Additive OPC (350 ppm, SG = 1,1 kg/L)

No	Feed (t/h)	Flow (ml/min)
1.	180	9.545,45
2.	190	10.075,76
3.	200	10.606,06
4.	210	11.136,36
5.	220	11.666,67
6.	230	12.197,73

Tabel 2. Setpoint Flow Additive PCC (400 ppm, SG = 1,1 kg/L)

No	Feed (t/h)	Flow (ml/min)
1.	190	11.636,36
2.	200	12.210,61
3.	210	12.787,88
4.	220	13.363,64
5.	230	13.939,39
6.	240	14.515,15
7.	250	15.151,52

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa terdapat hubungan linier antara feed material dan kebutuhan flow cement additive pada kedua jenis semen, yaitu OPC dan PCC. Peningkatan feed menyebabkan kenaikan flow secara proporsional sesuai dengan nilai dosis yang ditetapkan.

Pada OPC (350 ppm), flow meningkat dari 9.545,45 ml/min pada 180 tph menjadi 12.197,73 ml/min pada 230 tph. Sedangkan pada PCC (400 ppm), flow meningkat dari 11.636,36 ml/min pada 190 tph hingga 15.151,52 ml/min pada 250 tph. Hal ini menunjukkan bahwa PCC membutuhkan flow additive yang lebih besar dibandingkan OPC pada kondisi feed yang sama akibat nilai dosis yang lebih tinggi.

Feed material dalam perhitungan ini merepresentasikan kondisi operasional aktual pada unit Finish Mill, sehingga perubahan feed mencerminkan fluktuasi beban proses di lapangan. Oleh karena itu, setpoint flow bersifat dinamis dan harus menyesuaikan secara real-time terhadap kondisi operasi.

Karakteristik linier antara feed dan flow ini mendukung penerapan kontrol Proportional-Integral (PI), karena sistem dapat diprediksi dan stabil terhadap perubahan beban proses.

Kalibrasi Flowmeter

Kalibrasi flowmeter dilakukan pada rentang operasional sistem yaitu 9000–15000 ml/min dengan interval 1000 ml/min dan waktu sampling selama 10 detik. Kalibrasi ini bertujuan untuk memastikan akurasi pembacaan flowmeter sebelum digunakan sebagai umpan balik pada sistem kontrol.

Perhitungan error kalibrasi. Nilai error pengukuran flowmeter dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Error (\%) = \frac{Flow\ Teoritis - Flow\ Aktual}{Flow\ Teoritis} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

Flow Teoritis = nilai referensi berdasarkan setpoint

Flow Aktual = hasil pengukuran aktual pada gelas ukur

Tabel 3. Hasil Kalibrasi Flowmeter (Sampling 10 detik)

No.	Setpoint Flow (ml/min)	Volume Teoritis (ml / 10 s)	Volume Aktual (ml)	Error (%)
1.	9000	1500	1530	2,00
2.	10000	1666	1700	2,00
3.	11000	1833	1870	2,02
4.	12000	2000	2040	2,00
5.	13000	2166	2210	2,00
6.	14000	2333	2380	2,01
7.	15000	2500	2550	2,00

Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa flowmeter memiliki tingkat deviasi yang masih dalam batas toleransi (< 3%) pada seluruh rentang pengukuran. Nilai error cenderung meningkat pada setpoint yang lebih tinggi, namun tetap berada dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi kontrol proses industri.

Parameter Kontrol PID

Parameter kontrol PID diperoleh melalui tuning eksperimental dengan pendekatan trial and error sebagaimana dijelaskan pada metode penelitian. Hasil tuning menunjukkan parameter optimal sebesar $K_p = 0,6$ dan $K_i = 20$ detik, yang menghasilkan respons sistem yang cepat, stabil, serta mampu mengikuti perubahan setpoint dengan deviasi yang rendah tanpa osilasi signifikan pada kondisi operasional.

Gambar 5. Tampilan Parameter Kontrol PI pada Sistem SCADA

P.I.D. Parametres				
	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
Proportional Gain	0.60	0.00	0.00	0.00
Integral Time	20.00 s	0.00 s	0.00 s	0.00 s
Derivative Time	0.00 s	0.00 s	0.00 s	0.00 s

Respon Sistem (Aktual Flow) Terhadap Setpoint

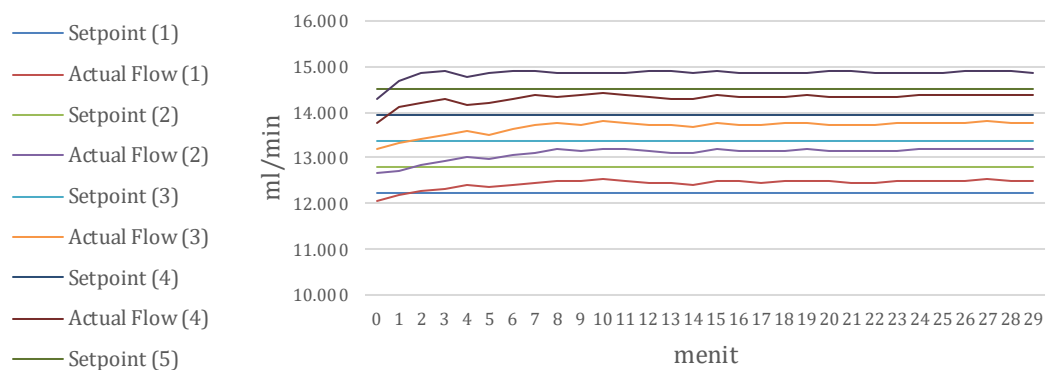
Pengujian respons sistem terhadap setpoint flow dilakukan pada saat proses produksi semen PCC sedang berlangsung. Pengujian dilaksanakan dengan berkoordinasi bersama operator lapangan serta memperoleh persetujuan untuk melakukan variasi setpoint tanpa mengganggu proses produksi.

Setpoint pengujian ditetapkan berdasarkan variasi feed material pada rentang 200–240 tph dengan interval kenaikan 10 tph. Setiap kondisi setpoint dioperasikan selama 30 menit untuk memperoleh data respon sistem secara representatif pada kondisi steady-state maupun transien. Sistem diuji dalam kondisi running plant, sehingga seluruh respons yang diperoleh mencerminkan kondisi operasional aktual pada unit Finish Mill.

Tabel 4. Hasil Uji Respons Sistem terhadap Setpoint Flow (Produksi PCC)

No	Feed (tph)	Setpoint Flow (ml/min)	Flow Aktual Rata-rata (ml/min)	Error (%)	Waktu Observasi
1.	200	12.210	12.430	1,80	30 menit
2.	210	12.787	13.020	1,82	30 menit
3.	220	13.363	13.620	1,92	30 menit
4.	230	13.939	14.220	2,01	30 menit
5.	240	14.515	14.840	2,24	30 menit

Grafik Setpoint VS Aktual Flow



Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem kontrol mampu mengikuti setpoint dengan baik pada seluruh variasi feed (200–240 tph). Nilai actual flow mendekati setpoint dengan deviasi kecil dan masih dalam batas toleransi < 3%.

Respons Sistem terhadap Perubahan Feed Material

Pengujian respons sistem terhadap perubahan feed material dilakukan pada kondisi produksi semen PCC dengan metode trial langsung di lapangan melalui koordinasi dengan operator. Variasi feed diberikan secara bertahap untuk mensimulasikan perubahan beban proses secara dinamis. Pengamatan difokuskan pada waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai setpoint baru serta kemampuan sistem dalam menjaga deviasi maksimum tidak melebihi 3%.

Tabel 5. Hasil Uji Respons terhadap Perubahan Feed Material

Tahap	Perubahan Feed (tph)	Setpoint Flow (ml/min)	Waktu Respon (detik)	Error Maks (%)	Keterangan
1	200 → 220	12.210 → 13.363	70	2,3	Respon cepat, stabil
2	220 → 240	13.363 → 14.515	85	2,7	Respon sedikit lebih lama
3	240 → 220	14.515 → 13.363	75	2,5	Respon cepat, stabil
4	220 → 200	13.363 → 12.210	65	2,2	Respon cepat, stabil

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem kontrol mampu merespons perubahan feed material dengan waktu penyesuaian yang cepat < 90 detik. Nilai error maksimum selama transisi tetap berada di bawah batas toleransi 3% serta tidak menunjukkan osilasi yang signifikan. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa sistem kontrol memiliki performa yang responsif dan stabil dalam menghadapi perubahan feed material secara real-time pada kondisi produksi.

IV. Kesimpulan

Implementasi sistem auto dosing berbasis PLC–SCADA dengan metode closed-loop control terbukti secara signifikan meningkatkan kinerja proses pada unit Finish Mill. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan akurasi injeksi additive dengan reduksi deviasi laju aliran dari 16% menjadi di bawah 3%, serta stabilitas sistem yang lebih baik dengan overshoot minimal. Secara teoretis, penelitian ini memperkuat kerangka aplikasi kontrol tertutup pada sistem dosing industri yang dinamis dan membuka peluang replikasi pada fasilitas industri semen dengan konfigurasi proses serupa. Meskipun efektif, sistem ini masih memiliki keterbatasan pada penentuan parameter dosis yang memerlukan intervensi operator. Oleh karena itu, pengembangan selanjutnya disarankan berfokus pada integrasi algoritma otomatisasi dosis berbasis tipe produk dan penerapan kontrol adaptif untuk meningkatkan robustness sistem terhadap variabilitas feed material yang lebih kompleks.

V. Daftar Pustaka

- [1] Li, J., Li, Y., Sun, M., Guo, Y., Cheng, F., & Gao, C. (2025). Studying the cement industry's policy incentives and the optimization path for carbon neutrality technology based on an integrated model. *Environment, Development and Sustainability*, 1-23.
- [2] Favier, A., Scrivener, K., & Habert, G. (2019, January). Decarbonizing the cement and concrete sector: integration of the full value chain to reach net zero emissions in Europe. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 225, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.
- [3] Wan, Y., Liu, W., Liu, X., Mai, Q., Li, H., Zhao, P., ... & Xu, S. Activation strategies and performance of steel slag–granulated blast furnace slag cementitious materials: A comprehensive review. Available at SSRN 5641155.
- [4] Sun, C., Chen, X., Yi, F., Li, J., & Ye, X. Coupled Utility of Binary Sewage Sludge Heat Treatment Productions in Portland Cement: Strength Evolution and Hydration Mechanisms. Available at SSRN 4914913.
- [5] R. Vieira *et al.*, “Performance evaluation of PLC systems for industrial automation,” *Sensors*, vol. 24, no. 3, p. 843, 2024.
- [6] Cancino-Escobar, M., Delgado-Del-Carpio, M., Solís-Cisneros, H. I., Mota-Grajales, R., & Hernández-Gutiérrez, C. A. (2024). Low-Latency FPGA-Based PLC Microprocessor for Industrial Automation in Compliance with IEC-61131-3. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(12), 16407-16420.
- [7] Zhang, L. (2023, November). PLC-Based Precision Control System Design and Realization of Electrical Equipment. In *2023 3rd International Signal Processing, Communications and Engineering Management Conference (ISPCEM)* (pp. 819-822). IEEE.
- [8] A. F. Obele, D. O. Aikhuele, and N. U. Herold, “Reliability concerns of programmable logic controllers (PLCs) in industrial automation systems,” *SSRN Electronic Journal*, 2024.
- [9] Khodaei, M. J., Candelino, N., Mehrvarz, A., & Jalili, N. (2020). Physiological closed-loop control (PCLC) systems: Review of a modern frontier in automation. *Ieee Access*, 8, 23965-24005.
- [10] Juarsa, D., Fadli, M., & Susanto, E. R. (2025). Rancang Bangun Modul Kontrol Berbasis PID untuk Pengaturan Kecepatan dan Posisi Motor DC Menggunakan STM32 dan Rotary Encoder. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, 4(4), 845-859.
- [11] Jabari, M., Ekinci, S., Izci, D., Zitar, R. A., Migdady, H., Smerat, A., & Abualigah, L. (2025). An advanced PID tuning method for temperature control in electric furnaces using the artificial rabbits optimization algorithm: M. Jabari et al. *International Journal of Dynamics and Control*, 13(5), 175.
- [12] Widodo, R., & Leestiana, F. (2022). Sistem Kendali Temperature pada Unit Boiler di Kilang PPSDM Migas Berbasis PLC. *Swara Patra: Majalah Ilmiah PPSDM Migas*, 12(1), 36-40.
- [13] Yang, T., Zheng, X., Xiao, H., Shan, C., Yao, X., Li, Y., & Zhang, J. (2023). Drying temperature precision control system based on improved neural network PID controller and variable-temperature drying experiment of cantaloupe slices. *Plants*, 12(12), 2257.
- [14] Putri, R. I., Setiawan, H. M., Setiawan, B., & Wibowo, S. H. (2022). Desain Sistem Kontrol Level Cairan Dengan Metode PID Berbasis PLC. *Jurnal ELTIKOM: Jurnal Teknik Elektro, Teknologi Informasi dan Komputer*, 6(2), 195-209.
- [15] Mercado Rivera, F. J., & Rojas Arciniegas, A. J. (2020). Additive manufacturing methods: techniques, materials, and closed-loop control applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(1), 17-31.
- [16] Li, Y., Tan, W., & Yu, M. (2024). Tuning rules of filtered PID/PIDD2 controller for integrating processes with measurement noise. *International Journal of Systems Science*, 55(3), 467-481.
- [17] Qian, G. M., Ghazali, M. R. B., & Ahmad, M. A. B. (2025). Data-Driven Variable Tracking Differentiation Sigmoid Proportional-Integral-Derivative Controller for Nonlinear Multiple Input Multiple Output System with White Noise. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 6(5), 2399-2412.
- [18] Tomar, I., Sreedevi, I., & Pandey, N. (2023). PLC and SCADA based real time monitoring and train control system for the metro railways infrastructure. *Wireless Personal Communications*, 129(1), 521-548.
- [19] Engin, D., Engin, M., Pmar, S., & Candan, M. (2021). PLC and SCADA Based Real-Time Monitoring and Control of Networked Processes. *J. Multidiscip. Eng. Sci. Technol*, 8, 14070-14080.

- [20] Maseda, F. J., López, I., Martija, I., Alkorta, P., Garrido, A. J., & Garrido, I. (2021). Sensors data analysis in supervisory control and data acquisition (SCADA) systems to foresee failures with an undetermined origin. *Sensors*, *21*(8), 2762.