# SISTEM PENGENDALIAN pH OTOMATIS BERBASIS SOLAR PV DAN KONTOL PID DENGAN KOMUNIKASI WIRELESS DI PENGOLAHAN AIR TAMBANG

**Arvin Permana Putra**[1]
[1]Prodi Teknik Instrumentasi Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas Gajah Mada No.38, Mentul, Karangboyo, Kec. Cepu, Kabupaten Blora, Jawa Tengah 58315
**E-mail*: *akunffarvin@gmail.com*

## ABSTRAK

Sistem pengendalian pH berbasis *wireless* dan *solar photovoltaic* (PV) dengan pengendali PID dirancang untuk meningkatkan efisiensi serta keberlanjutan proses pengolahan air limbah di area MHR 1. Tujuan utama sistem ini adalah mewujudkan pemantauan dan pengendalian pH yang berlangsung secara otomatis, mandiri, dan ramah lingkungan tanpa bergantung pada pasokan listrik konvensional. Sistem memanfaatkan panel surya sebagai sumber energi utama yang disimpan dalam baterai $LiFePO_4$, sensor pH industri Mettler Toledo M400 sebagai pengukur variabel proses, serta modul komunikasi Modbus (DAT8015) untuk mengirimkan data digital ke PLC Schneider Modicon M580 dan sistem SCADA. Pengendalian proses dilakukan menggunakan metode PID guna menjaga kestabilan pH sesuai nilai *setpoint,* sehingga proses netralisasi air dengan *slurry* kapur dapat berjalan optimal. Saat nilai pH mengalami perubahan mendadak, sistem mampu menyesuaikan laju injeksi *lime slurry* dengan cepat sehingga pH kembali ke rentang 7–8 dalam waktu sekitar 3 menit, dengan respon kontrol yang tetap halus tanpa fluktuasi ekstrem (*steady-state error* < ±0,2). Efisiensi energi surya tercatat mencapai 85%, memungkinkan sistem beroperasi secara mandiri selama 24 jam tanpa pasokan listrik konvensional. Hasil implementasi secara keseluruhan menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan pembacaan pH *real-time,* mentransmisikan data secara stabil melalui jaringan Modbus TCP, serta mendukung prinsip *green mining* melalui pemanfaatan energi terbarukan di area tambang terpencil.

**Kata kunci: *pH meter, PID control, solar PV,* Modbus TCP, SCADA, Sistem monitoring otomatis**

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri pertambangan di Indonesia menuntut penerapan teknologi yang efisien, aman, dan ramah lingkungan. Dalam proses pengolahan mineral, salah satu aspek penting yang harus diperhatikan adalah pengelolaan limbah cair, khususnya pengendalian nilai pH. Nilai pH yang tidak terkontrol dapat menyebabkan pencemaran lingkungan, menurunkan kualitas air, serta melanggar baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah [1].Pengelolaan air asam tambang (AAT) menjadi faktor kunci dalam penerapan green supply chain management di sektor pertambangan, karena air limbah dengan pH rendah dapat merusak ekosistem dan menurunkan kualitas air tanah.

Dalam praktiknya, fenomena *acid mine drainage* (AMD) banyak dijumpai di kegiatan pertambangan batubara maupun emas di Indonesia. Air dengan pH rendah (asam) umumnya dihasilkan akibat oksidasi mineral sulfida pada batuan buangan tambang yang bereaksi dengan air dan oksigen. Untuk menetralkan kondisi tersebut, proses penambahan bahan alkalis seperti lime slurry atau quicklime sering dilakukan [2]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode netralisasi kimiawi menggunakan kalsium oksida mampu menaikkan pH air tambang hingga batas aman sebelum dilepaskan ke lingkungan.

Namun, kegiatan pemantauan dan pengendalian pH sering menghadapi kendala di lapangan, terutama pada area yang jauh dari sumber listrik seperti Mine Haul Road (MHR) 1 di tambang emas milik PT X. Pemantauan manual di area terpencil kurang efisien dan berisiko tinggi terhadap kesalahan manusia (human error). Oleh karena itu, diperlukan sistem otomatis yang mampu bekerja secara mandiri dengan sumber energi terbarukan serta dapat mengirimkan data secara real-time [3],[4].

Pemanfaatan energi surya (solar photovoltaic/PV) menjadi solusi yang tepat untuk mendukung operasi sistem instrumentasi di area tanpa jaringan listrik [3],[5],[6]. Sistem ini dapat menggerakkan sensor pH, modul komunikasi, dan pengendali tanpa ketergantungan pada pasokan listrik konvensional.[5] menunjukkan bahwa sistem wireless sensor network berbasis tenaga surya mampu memantau kualitas air, termasuk pH, suhu, dan konduktivitas, secara berkelanjutan di lapangan terbuka. Hasil serupa juga ditunjukkan oleh Jeebkaew dkk.[7], di mana sistem tenaga surya diterapkan untuk pemantauan kualitas air di Sungai Nonghan menggunakan sensor nirkabel yang hemat energi.

Dalam konteks industri 4.0, sistem pemantauan air berbasis Internet of Things (IoT) telah menjadi tren untuk mengintegrasikan sensor, pengendali, dan jaringan komunikasi seperti LoRaWAN dan ZigBee[4],[8]. Sistem semacam ini memungkinkan pengiriman data jarak jauh secara stabil serta pemantauan kondisi lingkungan secara real-time dari pusat kontrol. Suparno juga mengembangkan sistem IoT untuk pemantauan limbah industri berbasis wireless yang dapat beroperasi menggunakan daya ganda dari solar dan jaringan utama.

Dibandingkan dengan metode kontrol lain seperti ON-OFF dan Fuzzy Logic, pengendalian menggunakan PID (Proportional-Integral-Derivative) menawarkan keseimbangan yang lebih baik antara kestabilan, akurasi, dan kecepatan respon sistem. Metode ON-OFF bersifat sederhana dan hanya bekerja dalam dua kondisi (aktif atau tidak aktif), sehingga sering menimbulkan osilasi dan tidak cocok untuk sistem yang memerlukan kendali presisi tinggi seperti pengaturan kualitas air atau tekanan fluida. Sementara itu, Fuzzy Logic memiliki keunggulan dalam menangani sistem non-linear dan ketidakpastian, namun membutuhkan proses perancangan aturan (rule base) yang kompleks serta kalibrasi manual yang cukup rumit.

Metode PID dipilih karena mampu memberikan respon yang halus dan stabil terhadap perubahan variabel proses, serta mudah diimplementasikan baik pada sistem konvensional maupun berbasis IoT. Selain itu, parameter proportional, integral, dan derivative dapat disesuaikan untuk mengoptimalkan performa sistem tanpa perlu logika kompleks. Dengan demikian, pengendalian PID menjadi solusi yang efisien dan andal untuk sistem pemantauan air otomatis di era industri 4.0.

PT X sebagai pengelola tambang emas memiliki komitmen terhadap penerapan prinsip green mining yang berkelanjutan. Pengembangan sistem pengendalian pH berbasis wireless dan solar PV dengan pengendali PID di area MHR 1 merupakan langkah strategis untuk meningkatkan efisiensi[9][10][11], mengurangi dampak lingkungan, dan memperkuat sistem monitoring berbasis energi terbarukan [1], [5].Dengan sistem ini, pengukuran pH dapat dilakukan secara otomatis, data dikirim melalui jaringan Modbus TCP menuju sistem SCADA, dan nilai pH dapat dikontrol secara stabil menggunakan algoritma PID. Penerapan teknologi ini diharapkan mendukung optimalisasi proses netralisasi air tambang sekaligus memperkuat komitmen perusahaan dalam mewujudkan operasi pertambangan yang efisien dan ramah lingkungan.

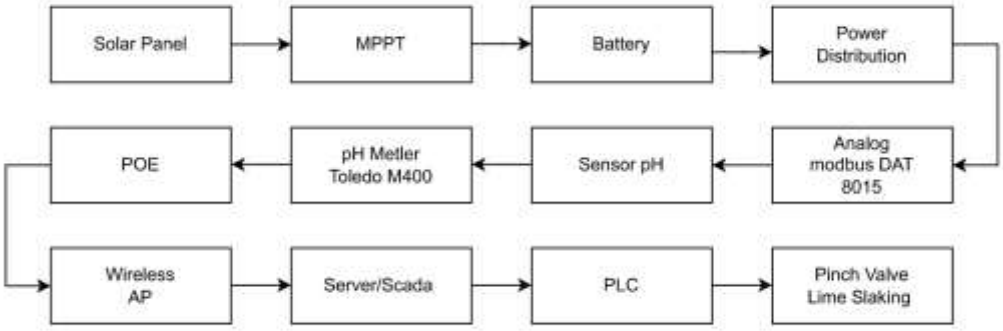
Namun, terdapat celah penelitian yang perlu diisi: studi terdahulu jarang menggabungkan ketiga aspek sekaligus pengendalian pH otomatis berbasis PID, komunikasi industrial (Modbus TCP) untuk integrasi SCADA, dan catu daya hybrid solar–grid dalam kondisi operasi tambang nyata seperti area MHR. Selain itu, literatur terkini masih terbatas dalam hal evaluasi kinerja jangka panjang pada kondisi fluktuatif (mis. variasi insolation, gangguan jaringan nirkabel,

perubahan beban proses), perbandingan strategi tuning PID yang adaptif terhadap gangguan energi, serta analisis keamanan data untuk sistem wireless di lingkungan pertambangan.

## 2. METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental dan perancangan sistem terapan (*applied system design*). Metode ini dipilih karena penelitian berfokus pada pengembangan sistem pengendalian pH berbasis *wireless* dan *solar photovoltaic (PV)* yang dikendalikan menggunakan algoritma PID. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk merancang, membangun, dan menguji sistem secara langsung di lapangan guna mengetahui kinerja dan efektivitasnya dalam kondisi operasi nyata.

Tahapan penelitian dimulai dengan studi literatur yang bertujuan untuk memperoleh landasan teori dan pemahaman teknis terkait sistem kontrol otomatis, komunikasi Modbus TCP/IP, prinsip kerja kontrol PID, serta penerapan energi surya dalam sistem instrumentasi. Studi ini juga mencakup pembahasan tentang karakteristik sensor pH, sistem SCADA, serta standar baku mutu pH pada air limbah industri pertambangan. Hasil dari studi literatur digunakan sebagai acuan dalam menentukan komponen dan metode kontrol yang tepat untuk sistem yang akan dirancang.




**Gambar 1. Diagram sistem**

Setelah itu dilakukan analisis kebutuhan sistem untuk menentukan komponen utama yang dibutuhkan dalam rancangan. Komponen tersebut meliputi sensor pH Mettler Toledo M400 sebagai pengukur variabel proses, modul komunikasi Modbus (DAT8015) sebagai pengubah sinyal analog ke digital, PLC Schneider Modicon M580 sebagai pengendali utama sistem, pompa dosing sebagai aktuator untuk injeksi *lime slurry*, serta sistem tenaga surya dengan panel PV dan baterai $LiFePO_4$ sebagai sumber energi utama. Analisis ini juga mencakup perhitungan kapasitas daya yang diperlukan agar sistem dapat beroperasi secara berkelanjutan tanpa ketergantungan pada pasokan listrik konvensional.

Tahap berikutnya adalah perancangan sistem, yang terdiri atas perancangan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Pada tahap perangkat keras, dilakukan integrasi antara sensor, modul komunikasi, PLC, dan sistem tenaga surya untuk memastikan seluruh komponen dapat bekerja secara sinergis. Sementara itu, pada tahap perangkat lunak dilakukan pemrograman logika kontrol PID di PLC menggunakan *software* EcoStruxure Control Expert serta pembuatan antarmuka SCADA menggunakan *software* EcoStruxure Operator Terminal Expert agar data dapat dipantau secara *real-time*.

Tahapan selanjutnya adalah implementasi dan pengujian sistem**,** yang dilakukan dengan cara merakit seluruh komponen sesuai rancangan dan menguji fungsinya di lapangan. Pengujian mencakup kalibrasi sensor pH, pengujian komunikasi data antara modul DAT8015 dan

PLC melalui jaringan Modbus TCP, serta pengujian performa kontrol PID dalam menjaga kestabilan nilai pH sesuai *setpoint*. Selain itu, dilakukan juga pengukuran efisiensi penggunaan energi dari sistem *solar PV* untuk memastikan kemandirian daya selama sistem beroperasi.

Data hasil pengujian dianalisis untuk menilai kinerja sistem secara keseluruhan. Analisis meliputi evaluasi respon kontrol PID, seperti *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *steady-state error*, serta kestabilan sistem dalam kondisi beban yang bervariasi. Hasil analisis digunakan untuk menentukan efektivitas sistem dalam menjaga nilai pH pada rentang yang diinginkan serta menilai keandalan sistem komunikasi dan efisiensi penggunaan energi.

Melalui metode ini, sistem pengendalian pH berbasis *wireless* dan *solar PV* yang dirancang diharapkan mampu beroperasi secara otomatis, efisien, dan berkelanjutan, serta menjadi solusi inovatif dalam mendukung penerapan teknologi energi terbarukan di sektor pertambangan yang ramah lingkungan

## A. Perancangan Hardware

Bagian ini menjelaskan perancangan hardware untuk sistem pengendalian pH berbasis wireless dan solar Pv

**Solar Panel**

**Gambar 2. *Solar Panel***

Panel surya berfungsi sebagai sumber utama energi listrik dalam sistem ini. Panel ini mengubah energi cahaya matahari menjadi listrik DC yang kemudian digunakan untuk mengisi baterai melalui solar charger. Solar panel sangat penting untuk menyediakan daya secara mandiri di area lapangan yang tidak terjangkau oleh jaringan listrik umum.

**MPPT Solar Charger**

***Gambar 3. MPPT Solar Charger***

MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) adalah pengatur daya yang menghubungkan panel surya dengan baterai. Fungsinya adalah untuk mengoptimalkan output dari panel surya dengan selalu menyesuaikan titik daya maksimum, sehingga pengisian baterai menjadi lebih efisien. Selain itu, MPPT juga melindungi baterai dari *overcharging.*

***Battery***

**Gambar 4. *Battery***

Baterai ini berfungsi sebagai penyimpan energi yang dihasilkan oleh panel surya. Dengan kapasitas 150Ah pada 24VDC, baterai ini mampu menyuplai daya ke seluruh perangkat meskipun tidak ada cahaya matahari (misalnya saat malam hari atau cuaca mendung). Jenis baterai LiFePO4 dipilih karena memiliki siklus hidup yang panjang dan lebih aman dibanding jenis baterai lainnya.

**Terminal Block**

**Gambar 5. Terminal *Block***

Terminal X1 dan X2 berfungsi sebagai titik distribusi daya dari baterai atau solar charger ke berbagai perangkat. Terminal X1 membawa tegangan positif 24VDC, sedangkan X2 membawa jalur ground (0VDC). Penggunaan terminal blok ini membuat wiring lebih rapi dan memudahkan saat troubleshooting atau perawatan.

**Modbus DAT8015**

**Gambar 6. Modbus DAT8015**

DAT8015 adalah modul yang digunakan untuk mengkonversi sinyal analog dari sensor menjadi data digital yang dapat dibaca oleh sistem kontrol melalui protokol Modbus RTU (RS-485). Modul ini menerima sinyal 4–20 mA dari pH meter dan mengubahnya menjadi nilai digital yang dapat dikomunikasikan ke sistem monitoring seperti PLC atau RTU. Modul ini juga memungkinkan pengukuran dari beberapa sensor sekaligus karena memiliki beberapa input analog.

**Arrester**

**Gambar 7. *Arrester***

Arrester berfungsi untuk melindungi sistem dari lonjakan tegangan mendadak yang disebabkan oleh petir atau gangguan listrik lainnya. Biasanya dipasang pada jalur power atau komunikasi (LAN), arrester akan membuang tegangan berlebih ke ground sebelum mencapai perangkat sensitif seperti controller atau sensor.

**PoE (*Power Over Ethernet*)**

**Gambar 8. *Power Over Ethernet***

PoE digunakan untuk menyuplai daya listrik dan data komunikasi secara bersamaan melalui kabel LAN ke perangkat seperti pH meter M400. Dengan PoE, tidak diperlukan kabel daya terpisah untuk perangkat remote, sehingga sistem menjadi lebih sederhana dan hemat biaya instalasi.

**pH Mettler Toledo M400**

**Gambar 9. *Mettler Toledo***

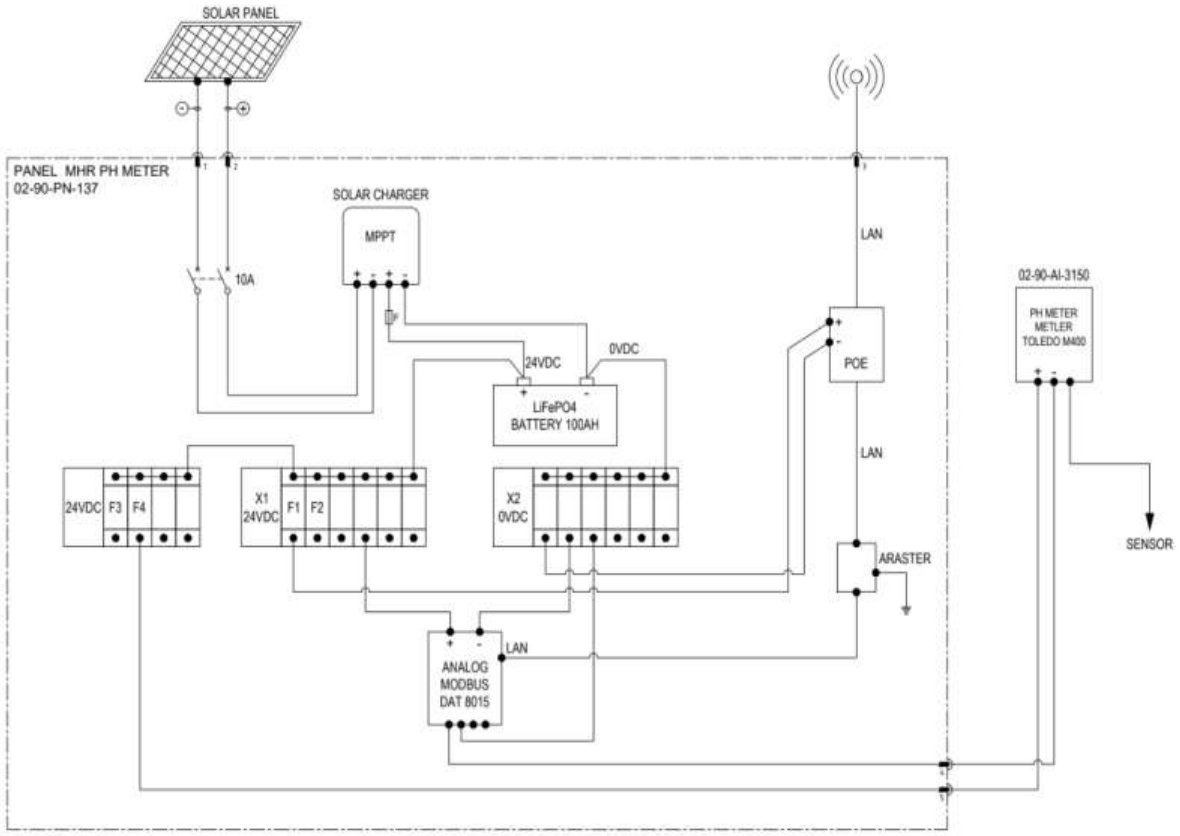
pH Mettler M400 adalah alat pengukur yang menerima sinyal dari sensor pH (probe) di lapangan, kemudian mengubahnya menjadi sinyal analog (4–20 mA) yang proporsional dengan nilai pH yang terukur. Perangkat ini juga bisa memiliki fitur digital seperti tampilan lokal dan komunikasi via LAN atau PoE untuk pengiriman data ke sistem monitoring

**pH Probe**

**Gambar 10. pH Probe**

Sensor ini merupakan alat utama yang ditempatkan di lapangan (biasanya di air atau larutan) untuk mendeteksi tingkat keasaman atau kebasaan cairan (nilai pH). Sensor ini mengirimkan sinyal ke pH meter M400, dan hasilnya digunakan untuk pemantauan kualitas air secara real-time.

## B. Perancangan Wiring Diagram




**Gambar 11. *Wiring Diagram***

Wiring diagram sistem pengendalian pH berbasis *wireless* dan *solar photovoltaic (PV)* dengan komunikasi Modbus TCP/IP ini menggambarkan integrasi antara sistem tenaga, sensor,

dan modul komunikasi agar seluruh perangkat dapat beroperasi secara otomatis dan mandiri. Sumber daya utama berasal dari panel surya yang menghasilkan tegangan 24VDC, kemudian dialirkan melalui fuse 10A menuju *solar charger* tipe MPPT yang berfungsi mengatur pengisian dan perlindungan baterai. Energi listrik disimpan pada baterai $LiFePO_4$ berkapasitas 100Ah dan didistribusikan ke seluruh komponen melalui terminal distribusi daya 24VDC yang dilengkapi sekering pengaman (F1–F4). Daya tersebut digunakan untuk menyuplai modul komunikasi Analog Modbus DAT8015, sistem Power over Ethernet (PoE), serta pH meter Mettler Toledo M400. Sensor pH mendeteksi nilai keasaman air limbah dan menghasilkan sinyal analog 4–20 mA yang dikirim ke modul DAT8015 untuk dikonversi menjadi data digital. Data kemudian dikirim melalui jaringan LAN ke sistem pengendali (PLC atau SCADA) menggunakan protokol Modbus TCP agar dapat dipantau secara *real-time*. Seluruh perangkat dihubungkan dengan sistem *araster* sebagai jalur pentanahan untuk mencegah gangguan listrik, sehingga sistem dapat bekerja dengan aman, stabil, dan efisien dalam memantau serta mengendalikan nilai pH secara otomatis di area tambang yang tidak memiliki pasokan listrik konvensional.

## 3. PEMBAHASAN

Sistem pengendalian pH berbasis wireless dan solar photovoltaic (PV) dengan pengendali PID dirancang untuk memantau serta menjaga kestabilan nilai pH air limbah tambang secara otomatis di area yang tidak memiliki pasokan listrik konvensional. Pada sistem ini, seluruh perangkat mendapatkan suplai daya dari panel surya berkapasitas 200 Wp yang dihubungkan ke solar charge controller tipe MPPT untuk mengatur pengisian daya ke baterai $LiFePO_4$ 100 Ah. Energi listrik yang tersimpan kemudian didistribusikan dalam bentuk tegangan 24VDC ke setiap perangkat melalui terminal distribusi daya yang dilengkapi dengan sekering pengaman untuk mencegah gangguan arus lebih. Desain sistem tenaga ini terbukti mampu menjaga kestabilan suplai daya, sehingga seluruh perangkat seperti sensor pH, modul komunikasi DAT8015, dan sistem Power over Ethernet (PoE) dapat beroperasi selama 24 jam penuh, termasuk saat intensitas cahaya matahari rendah.

**Gambar 12. Panel *Project***

Sensor pH Mettler Toledo M400 berfungsi sebagai komponen utama dalam pengukuran tingkat keasaman air limbah. Sensor ini menghasilkan sinyal analog dengan rentang arus 4–20 mA sesuai perubahan nilai pH yang terdeteksi pada lapangan. Sinyal tersebut dikirim ke modul Analog Modbus DAT8015, yang bertugas mengonversi sinyal analog menjadi data digital berbasis protokol Modbus TCP/IP. Proses konversi ini memungkinkan data dikirimkan secara real-time melalui jaringan LAN menuju sistem pengendali utama (PLC) dan sistem SCADA. Data yang diterima diolah oleh PLC Schneider Modicon M580 menggunakan algoritma kontrol PID (Proportional–Integral–Derivative), di mana parameter Kp, Ki, dan Kd diatur agar respon sistem terhadap perubahan pH tetap stabil dan tidak menimbulkan overshoot berlebih. Hasil pengolahan PID digunakan untuk mengendalikan pompa dosing, yang secara otomatis menambahkan larutan lime slurry ke dalam aliran air ketika nilai pH berada di bawah setpoint (pH < 7).

$$K_p = \frac{\%\Delta PV}{\%\Delta MV} = \frac{\%\Delta Measurment}{\%\Delta Manipulated\ Variable}$$

$$K_p = \frac{(\frac{340-200}{500}) \times 100\%}{(\frac{50-30}{100}) \times 100\%}$$

$$K_p = \frac{(\frac{140}{500}) \times 100\%}{(\frac{20}{100}) \times 100\%}$$

$$K_p = \frac{28\%}{20\%}$$

$$K_p = 1{,}4$$

$$T_p = 30sec - 20sec$$

$$T_p = 10sec$$

$$K_c = \frac{1}{K_p}\frac{T_p}{\Lambda}$$

$$K_c = \frac{1}{1.4}\,10sec$$

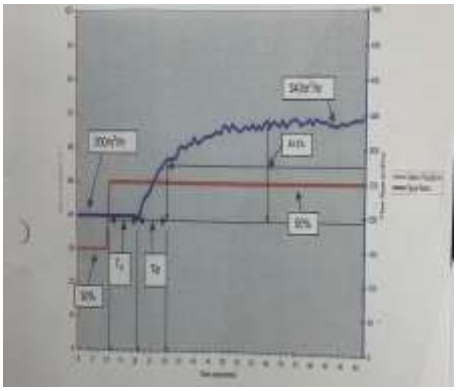
$$K_c = 7{,}14$$

$$P = K_c = 7{,}14$$

$$I = T_p = 10sec$$

**Gambar 13. Mencari Proses *Gain, Time Constan* dan Nilai KC**

Hasil pengujian sistem menunjukkan bahwa penggunaan kontrol PID memberikan kestabilan respon yang lebih baik dibandingkan kontrol manual. Saat nilai pH mengalami perubahan mendadak, sistem mampu menyesuaikan injeksi lime slurry dengan cepat sehingga pH kembali pada rentang 7–8 dalam waktu singkat. Selain itu, respon sistem tetap halus tanpa fluktuasi ekstrem (steady-state error < ±0,2), menunjukkan bahwa konfigurasi PID yang digunakan sudah efektif. Melalui sistem komunikasi Modbus TCP, data pH, status pompa, serta kondisi daya baterai dan panel surya dapat dipantau secara real-time melalui SCADA, sehingga operator dapat melakukan pengawasan dari jarak jauh tanpa perlu ke lokasi instalasi.

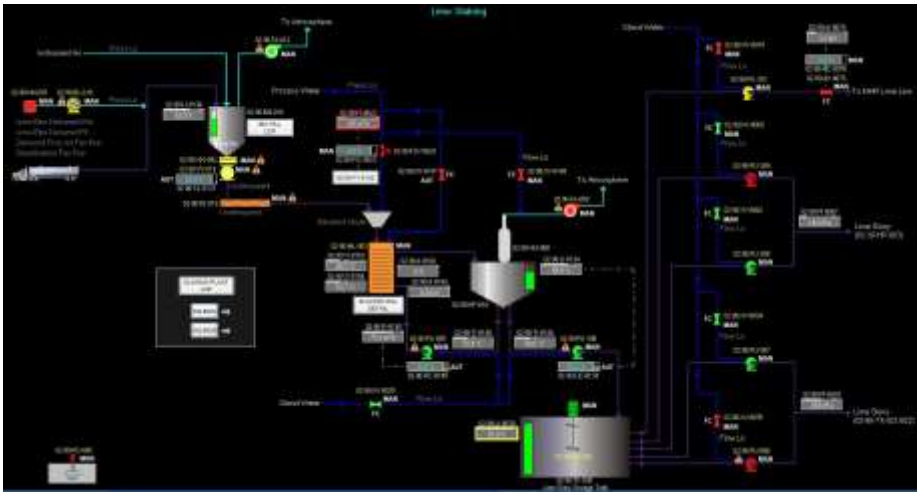


**Gambar 14. Grafik Untuk Menentukan PID**

Dari sisi efisiensi energi, sistem ini terbukti hemat daya karena seluruh perangkat dikonfigurasi dengan konsumsi rendah dan bekerja menggunakan sumber energi terbarukan. Penggunaan panel surya sebagai sumber daya utama berhasil menekan ketergantungan terhadap

listrik PLN dan mendukung penerapan konsep green mining di area pertambangan. Selain itu, sistem ini juga memiliki tingkat keandalan tinggi karena tetap berfungsi meskipun dalam kondisi cuaca mendung berkat cadangan daya dari baterai $LiFePO_4$.

Secara keseluruhan, hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem pengendalian pH berbasis wireless dan solar PV dengan PID control mampu bekerja dengan baik dalam menjaga kualitas air limbah tambang agar memenuhi baku mutu lingkungan. Integrasi antara sistem tenaga surya, komunikasi digital Modbus TCP, dan pengendalian PID terbukti efektif meningkatkan efisiensi, keandalan, serta keberlanjutan operasional di area terpencil. Dengan keberhasilan ini, sistem dapat dijadikan model penerapan teknologi otomasi berbasis energi terbarukan pada pengelolaan limbah cair di sektor pertambangan yang berorientasi pada efisiensi dan ramah lingkungan.



**Gambar 15. Tampilan Scada**

## 4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem pengendalian pH berbasis *wireless* dan *solar photovoltaic (PV)* dengan pengendali PID mampu berfungsi secara efektif, stabil, dan mandiri dalam menjaga kualitas air limbah di area tambang. Sistem ini berhasil mengintegrasikan berbagai komponen utama, seperti sensor pH Mettler Toledo M400, modul komunikasi Modbus DAT8015, PLC Schneider Modicon M580, serta sistem tenaga surya dengan baterai $LiFePO_4$, sehingga mampu bekerja secara berkelanjutan tanpa ketergantungan terhadap pasokan listrik konvensional. Penerapan kontrol PID memberikan hasil yang stabil dengan respon cepat terhadap perubahan nilai pH, di mana sistem dapat mengembalikan kondisi pH ke setpoint (7–8) dengan *steady-state error* yang kecil. Selain itu, penggunaan jaringan komunikasi berbasis Modbus TCP memungkinkan data pH, status pompa, dan kondisi daya dipantau secara *real-time* melalui sistem SCADA, sehingga meningkatkan efisiensi operasional dan memudahkan proses pengawasan jarak jauh. Dari aspek energi, sistem berbasis *solar PV* terbukti efisien dan ramah lingkungan karena mampu menyediakan kebutuhan daya seluruh perangkat selama 24 jam, mendukung penerapan konsep *green mining* di industri pertambangan. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan terbukti layak diterapkan sebagai solusi otomasi pengendalian kualitas air limbah di area tambang terpencil, sekaligus menjadi langkah nyata dalam penerapan teknologi kontrol berbasis energi terbarukan yang efisien dan berkelanjutan.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

[1] O. N. Samijayani, T. P. Saputra, H. Firdaus, and A. Mujadin, "Solar Powered Wireless Sensor Network for Water Quality Monitoring and Classification," *Green Intell. Syst. Appl.*, vol. 3, no. 1, pp. 14–21, 2023, doi: 10.53623/gisa.v3i1.244.

[2] J. B. M. Damir B. Krklješ, Goran V. Kitić, Csaba M. Petes, Slobodan S. Birgermajer, Jovana D. Stanojev, Branimir M. Bajac, Marko N. Panić, Vasa M. Radonić, Ilija D. Brčeski, Rok M. Štravs, Nikolina N. Janković, "Multiparameter Water Quality Monitoring System for Continuous Monitoring of Fresh Waters," pp. 1–9, 2023.

[3] Muhammad Iqbal, "Remote Multisensor System for Environmental Quality Monitoring Applications (Water and Air) in Internet of Things-Based Aquaculture Environments," *Sunan Kalijaga J. Phys.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, 2023, doi: 10.14421/physics.v5i1.3353.

[4] D. . V.Karthikeyan, Geethanjali.S, Mekala.M, "Water Eminence Scrutinizing Scheme Based On Zigbee and Wireless Antenna Expertise," pp. 1–9, 2014, doi: https://arxiv.org/abs/1402.0736?utm_source.

[5] M. Rafasani, S. Pramono, and P. S. Rudati, "Aplikasi solar energy harvesting dalam jaringan sensor nirkabel pemantauan kualitas udara," *JITEL (Jurnal Ilm. Telekomun. Elektron. dan List. Tenaga)*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, 2022, doi: 10.35313/jitel.v2.i1.2022.1-10.

[6] P. A.B, W. W, W. D, and I. jono, "Developing Monitoring System for Solar Water Pump based on Wireless Sensor Network in Grigak Beach, Yogyakarta, Indonesia," *Int. J. Comput. Trends Technol.*, vol. 68, no. 1, pp. 31–34, 2020, doi: 10.14445/22312803/ijctt-v68i1p107.

[7] "The Use of Mining Waste Materials for the Treatment of Acid and Alkaline Mine Wastewater," pp. 1–9, 2020, doi: https://www.mdpi.com/904578.

[8] Y. W. Darsono, A. Adianto, and M. Apriani, "Komunikasi Data Berbasis Protokol UDP pada Sistem Ubiquitous Mobile Sensing Kualitas Sumber Air," *IJCCS (Indonesian J. Comput. Cybern. Syst.*, vol. 10, no. 2, p. 219, 2016, doi: 10.22146/ijccs.15491.

[9] J. Sudrajat, "ANALISIS KINERJA HEAT EXCHANGER SHELL & TUBE PADA SISTEM COG BOOSTER DI INTEGRATED STEEL MILL KRAKATAU," *J. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 3, p. 174, Nov. 2017, doi: 10.22441/JTM.V6I3.1967.

[10] S. Mohsen, "A Solar Energy Harvester for a Wireless Sensor System toward Environmental Monitoring," *Proc. Eng. Technol. inoculations*, 2022, doi: https://doi.org/10.46604/peti.2022.9210.

[11] G. N. and G. V. Suman Arora, "A Solar, Thermal, and Piezoelectric Based Hybrid Energy Harvesting for IoT and Underwater WSN Applications," 2023.