

PERANCANGAN SISTEM OPTIMALISASI PEMURNIAN EMAS RAMAH LINGKUNGAN DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEKTROWINNING BERBASIS MIKROKONTROLLER

1st Kelvin Prasetya
Departement of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia
kelvinprasetya@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Mohammad Yanuar Hariyawan
Departement of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia
myanuar@telkomuniversity.ac.id

3rd Eka Sari Oktarina
Departement of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia
ekasario@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Emas adalah logam mulia yang dicari karena nilai ekonominya yang tinggi. Pemurnian emas umumnya dilakukan melalui metode pirometalurgi dan hidrometalurgi, seperti sianidasi dan amalgamasi, namun metode ini menghasilkan limbah berbahaya seperti sianida dan merkuri yang mencemari lingkungan dan merugikan kesehatan manusia serta ekosistem. Penelitian ini mengembangkan dan mengoptimalkan proses pemurnian emas dengan metode elektrowinning yang dikendalikan mikrokontroler untuk mengatur tegangan, arus, aliran elektrolit, waktu pemurnian, dan pH larutan. Prinsip elektrolisis digunakan untuk mereduksi ion emas menjadi endapan emas pada katoda. Pengaturan otomatis ini meningkatkan efisiensi, konsistensi, serta mengurangi konsumsi energi dan limbah, menjadikan elektrowinning metode yang efektif dan ramah lingkungan untuk pemurnian emas dalam skala industri kecil maupun besar.

Kata kunci— Pemurnian Emas, Elektrowinning, Mikrokontroler, Ramah Lingkungan.

I. PENDAHULUAN

Metode Pemurnian emas terbagi menjadi dua yaitu tradisional dan modern. Pada metode tradisional biasanya di gunakan metode pendulangan yang merupakan cara tertua dan sederhana dengan memanfaatkan prinsip dasar gravitasi dan perbedaan densitas antara emas dan material lainnya. Cara tradisional lainnya yaitu menggunakan merkuri yang dikenal dengan nama amalgamasi yang melibatkan pencampuran merkuri dengan material yang mengandung emas untuk membentuk amalgam emas-merkuri. Dan pada metode modern yang di gunakan sebagai teknik pemurnian emas diantaranya adalah pirometalurgi yaitu dengan menggunakan energi panas, ataupun hidrometalurgi seperti

sianidasi dan amalgamasi dengan menggunakan campuran bahan kimia[1].

Pemisahan emas dengan metode tersebut sangat efektif dan mudah sehingga hampir semua penambangan menggunakan metode tersebut. Hanya saja, limbah yang dibuang ke lingkungan yang berupa cairan mengandung sianida dan gas yang mengandung raksa sangat berbahaya bagi pelestarian lingkungan dan kesehatan manusia. Sianida bisa larut dalam air, sedimen dan biota laut, akibatnya terjadi kontaminasi pada biota laut, sehingga dikhawatirkan keanekaragaman hayati mengalami kepunahan. Demikian juga uap raksa merupakan racun yang sangat berbahaya bagi kesehatan manusia dan bahkan dapat mengendap pada ikan dan hewan sehingga membahayakan konsumen ikan tersebut[2].

Dari hasil studi literatur didapatkan bahwa metode yang paling efektif dan aman untuk lingkungan adalah menggunakan metode elektrowinning. Elektrowinning adalah proses di mana emas diekstraksi dari larutan yang mengandung ion emas dengan melewati arus listrik melalui larutan tersebut. Proses ini dilakukan dalam sel elektrolisis yang terdiri dari katoda (elektroda negatif) dan anoda (elektroda positif). Ketika arus listrik mengalir melalui sel, ion logam bergerak ke katoda dan mengendap sebagai logam padat. Larutan yang mengandung emas berfungsi sebagai konduktor antara katoda dan anoda. Ketika arus listrik dialirkan, emas dari larutan mengendap pada katoda. Reaksi kimia yang terjadi di katoda melibatkan pemisahan ion emas menjadi partikel emas padat dan ion sianida yang tetap dalam larutan[3].

Proses electrowinning emas melibatkan beberapa faktor penting yang harus diatur dengan baik agar efisien dan menghasilkan emas berkualitas tinggi yang dipengaruhi oleh parameter elektrokimia dan fisik. Beberapa parameter

elektrokimia meliputi konsentrasi dan komposisi elektrolit, suhu, kerapatan arus, dan kekuatan aditif, sedangkan parameter fisik meliputi distribusi arus, waktu, dan laju aliran elektrolit. Emas sering terkontaminasi oleh logam dasar seperti tembaga, besi, nikel, dan kobalt yang ikut terelusi selama operasi sebelumnya[4]. Tegangan sel harus tepat, biasanya sekitar 3.5V, karena tegangan yang terlalu rendah tidak akan mengendapkan emas, sementara tegangan yang terlalu tinggi bisa menyebabkan reaksi yang tidak diinginkan. Arus listrik yang mengalir melalui sel juga harus dijaga pada tingkat yang optimal. Konduktivitas larutan elektrolit perlu ditingkatkan dengan menambahkan bahan seperti kaustik untuk mencegah korosi dan pembentukan gas hidrogen. Konsentrasi emas dalam larutan sangat penting; semakin tinggi konsentrasinya, semakin cepat emas dapat diendapkan. Suhu larutan yang lebih tinggi sedikit membantu meningkatkan efisiensi proses. Selain itu, memperbesar luas permukaan katoda tempat emas diendapkan dan memastikan larutan tercampur dengan baik dalam sel akan meningkatkan efisiensi pengendapan. Konsentrasi sianida dalam larutan juga perlu dijaga pada tingkat yang tepat untuk mengoptimalkan proses. Semua faktor ini saling berkaitan dan harus diatur dengan hati-hati agar proses berjalan dengan lancar dan efisien, menghasilkan emas dengan kemurnian tinggi[3].

Larutan elektrolit yang telah melalui proses elektrowinning dapat digunakan kembali dengan cara menghilangkan pengotor dan mengembalikan bahan kimia yang dapat digunakan lagi. Pertama, larutan elektrolit dicampur dengan NaOH untuk memisahkan natrium karbonat (Na₂CO₃). Kemudian, Na₂CO₃ ini diubah kembali menjadi NaOH menggunakan kalsium oksida (CaO), yang juga menghasilkan residu kalsium karbonat (CaCO₃). Proses ini juga efektif menghilangkan pengotor seperti besi (Fe), tembaga (Cu), dan terutama arsenik (As), yang dapat mengganggu proses elektrolisis. Hasilnya adalah larutan elektrolit yang dapat digunakan kembali, mengurangi kebutuhan bahan kimia baru dan mengurangi limbah berbahaya, sehingga lebih ramah lingkungan. Dengan proses ini, larutan elektrolit yang telah melalui proses electrowinning dapat digunakan kembali untuk siklus pelindian berikutnya[5].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengoptimalkan metode pemurnian emas menggunakan teknik elektrowinning yang dikendalikan oleh mikrokontroler. Tujuan utamanya adalah meningkatkan efisiensi pemurnian emas dengan mengatur parameter-parameter penting secara otomatis, mengurangi dampak lingkungan sekaligus keamanan operator dengan menambahkan pengendalian exhaust fan melalui mikrokontroler yang di filter berdasarkan kadar hidrogen yang dihasilkan untuk meminimalkan limbah udara berbahaya dan untuk mengurangi konsumsi energi yang dibaca dan dikendalikan langsung oleh modul XY-6020L atas perintah dari mikrokontroler. Selain itu, penelitian ini berupaya meningkatkan konsistensi dan kualitas emas yang dihasilkan serta mengembangkan metode yang dapat diterapkan secara efektif dalam skala industri, menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis dibandingkan metode tradisional.

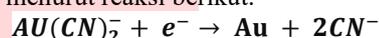
II. KAJIAN TEORI

A. Elektrowinning

Elektrowinning adalah proses di mana emas diekstraksi dari larutan yang mengandung ion emas dengan melewati arus listrik melalui larutan tersebut. Proses ini dilakukan dalam sel elektrolisis yang terdiri dari katoda (elektroda negatif) dan anoda (elektroda positif). Ketika arus listrik mengalir melalui sel, ion logam bergerak ke katoda dan mengendap sebagai logam padat. Larutan yang mengandung emas berfungsi sebagai konduktor antara katoda dan anoda. Ketika arus listrik dialirkan, emas dari larutan mengendap pada katoda. Reaksi kimia yang terjadi di katoda melibatkan pemisahan ion emas menjadi partikel emas padat dan ion sianida yang tetap dalam larutan.

Berikut reaksi kimia yang di hasilkan antara anoda dan katoda :

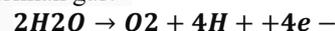
1. Reaksi pada Katoda : Emas dari larutan mengendap di katoda menurut reaksi berikut.



Ion Sianida Emas + Elektron → Emas Padat + Ion Sianida

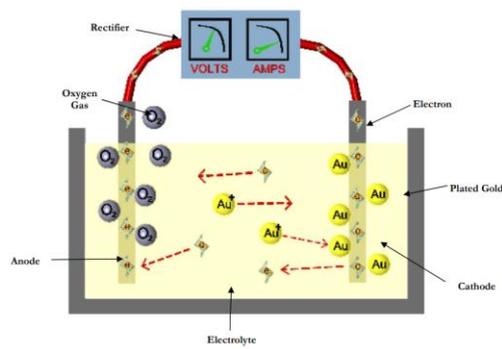
Ini menggambarkan reaksi elektrokimia di mana ion sianida emas (Au(CN)₂⁻) menerima elektron (e⁻) dan diubah menjadi emas padat (Au) serta ion sianida (CN⁻). Reaksi ini terjadi pada katoda selama proses elektrowinning emas.

2. Reaksi pada Anoda : Pada anoda, terjadi oksidasi air yang menghasilkan gas:



Air → Oksigen + Ion Hidroksil + Elektron

Ini menggambarkan reaksi elektrokimia di anoda selama proses elektrowinning, di mana air (H₂O) terurai menjadi gas oksigen (O₂), ion hidroksil (OH⁻), dan elektron (e⁻). Reaksi ini terjadi pada anoda dan merupakan bagian penting dari proses elektrolisis.



Gambar 1
(Proses Elektrowinning)

Beberapa faktor yang mempengaruhi efisiensi dan kinerja sel elektrowinning meliputi Tegangan sel, Arus sel, Konduktivitas Larutan, Konsentrasi Emas, Suhu Elektrolit dan Luas Permukaan Katoda[3].

B. Larutan Elektrolit

Elektrolisis adalah proses kimia yang menggunakan arus listrik untuk memecah senyawa menjadi unsur-unsurnya. Dalam elektrolisis, larutan elektrolit yang mengandung ion-ion bergerak bebas sangat diperlukan. Contoh umum adalah larutan garam dapur (NaCl) dalam air, yang terdisosiasi

menjadi ion natrium (Na^+) dan ion klorida (Cl^-). Ketika arus listrik dialirkan melalui larutan ini, ion-ion bergerak menuju elektroda yang berlawanan muatan: ion natrium bergerak menuju katoda (elektroda negatif) dan mengalami reduksi menjadi natrium logam, sementara ion klorida bergerak menuju anoda (elektroda positif) dan mengalami oksidasi menjadi gas klorin. Proses ini tidak hanya terjadi pada garam dapur tetapi juga pada banyak senyawa lainnya yang terdisosiasi dalam larutan, menghasilkan berbagai reaksi elektrokimia yang berguna dalam industri dan laboratorium[10].

Dalam konteks elektrowinning emas, larutan elektrolit biasanya terdiri dari larutan sianida emas ($\text{Au}(\text{CN})_2^-$) yang dihasilkan dari proses elusi. Larutan ini mengandung ion emas yang akan diendapkan sebagai logam emas pada katoda melalui proses elektrolisis[3].

C. Algoritma Hill Climbing

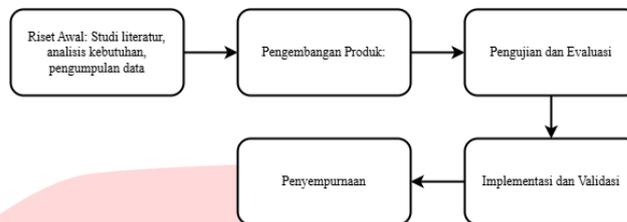
Algoritma Hill Climbing adalah sebuah algoritma pencarian lokal (local search algorithm) yang digunakan untuk memecahkan masalah optimasi matematis dan komputasional. Algoritma ini bekerja secara iteratif, mulai dari sebuah solusi awal (state awal) dan secara berulang bergerak ke arah solusi tetangga (neighbor) yang memiliki nilai lebih baik berdasarkan fungsi objektif atau fungsi heuristik yang telah ditentukan. Konsep dasarnya mirip dengan pendaki gunung yang berusaha mencapai puncak dengan selalu mengambil langkah menanjak. Algoritma ini akan berhenti ketika mencapai sebuah puncak lokal, yaitu keadaan di mana tidak ada lagi tetangga yang memiliki nilai lebih baik dari keadaan saat ini. [11].

Dalam implementasi ini, algoritma Hill Climbing yang digunakan adalah prinsip Perturb and Observe (P&O), sebuah bentuk Simple Hill Climbing yang dimodifikasi. Pendekatan P&O ini banyak digunakan dalam optimasi daya misalnya pada sistem panel surya di mana sistem secara periodik mengganggu (perturb) nilai input dan mengamati (observe) perubahan daya untuk menentukan arah optimalisasi. Algoritma ini berfokus pada optimasi Daya Listrik yang disalurkan ke sel elektrowinning. Daya dan efisiensi ini merupakan respons dari rambatan arus dalam larutan elektrolit yang secara langsung mencerminkan energi yang tersedia untuk proses pengendapan. Michael S. Moats dalam penelitiannya menekankan bahwa daya listrik merupakan komponen biaya tertinggi dan efisiensi energi adalah perhatian utama dalam operasi electrowinning[7].

III. METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah menggunakan metode Research and Development (R&D) yang di bagi ke dalam beberapa tahap. Prosesnya dimulai dengan studi literatur untuk mengidentifikasi masalah pada metode konvensional (amalgamasi dan sianidasi) dan menetapkan elektrowinning sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan. Selanjutnya, dilakukan pengembangan produk yang lebih detail, mencakup arsitektur, alur kerja logis, dan desain fisik. Selanjutnya ada tahap Pengujian dan Evaluasi dari keseluruhan proses untuk melihat bagaimana kinerja sebelum implementasi. Tahap implementasi merealisasikan desain tersebut dengan merakit komponen fisik dan mengembangkan perangkat lunak yang dapat memonitor data dari sensor dan mengontrol aktuator.

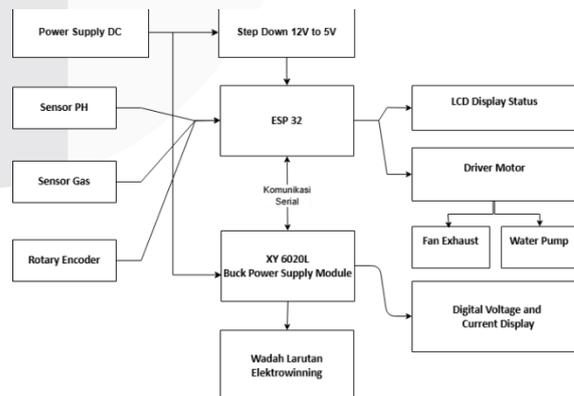
Setelah sistem selesai, dilakukan penyempurnaan untuk memastikan fungsionalitas dan keandalannya, baik pada tingkat komponen maupun integrasi sistem secara keseluruhan. Dan akhirnya, analisis data dan penarikan kesimpulan dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem, efisiensi energi, dan tingkat keamanan yang dicapai, yang menjadi dasar untuk merumuskan kesimpulan definitif dan saran strategis untuk pengembangan di masa depan.



Gambar 2 (Diagram Alur Penelitian)

A. Desain Sistem

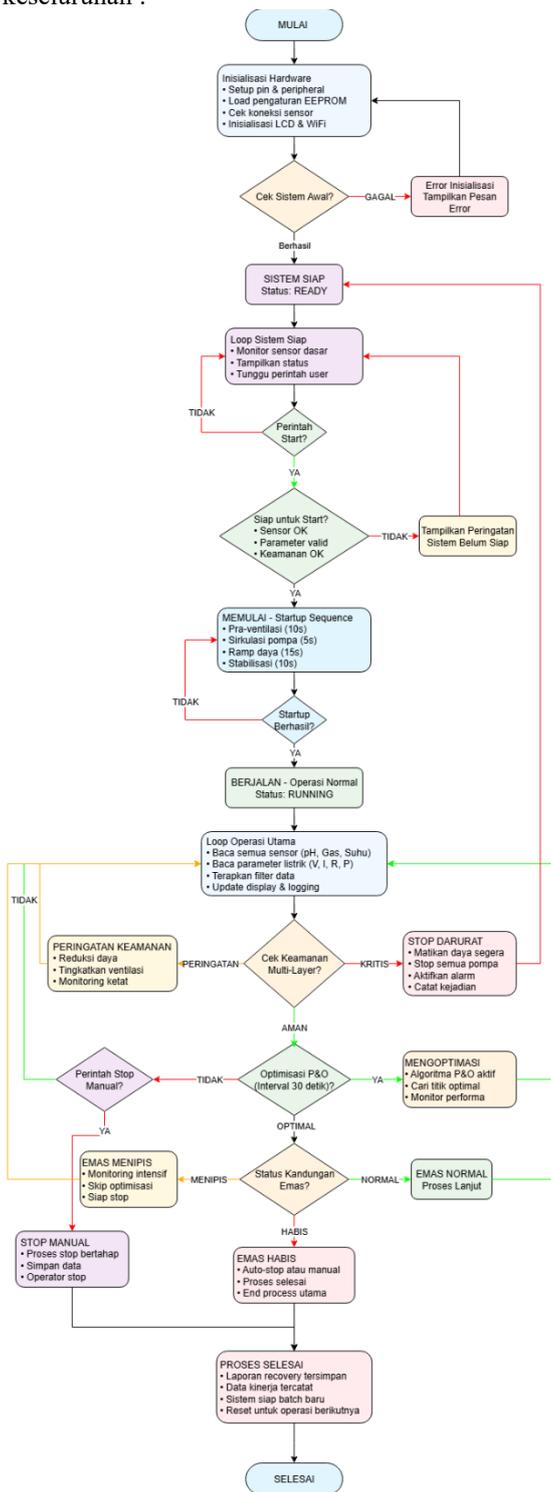
Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi. Sensor pH mengukur tingkat keasaman atau kebasaan larutan, sementara sensor gas memantau adanya gas yang dihasilkan selama proses. Modul catu daya XY-6020L, yang dilengkapi dengan sensor arus dan tegangan internal, mengirimkan data pemantauan ke ESP32 sebagai unit kontrol utama. ESP32 kemudian mengelola data tersebut dan mengirimkan perintah kembali ke XY-6020L untuk mengatur tegangan dan arus output secara presisi sesuai kebutuhan proses pemisahan logam pada mesin elektrowinning. Sistem ini dilengkapi dengan perangkat pendukung seperti power supply untuk menyediakan daya, step down, driver motor untuk mengendalikan motor, fan exhaust untuk mengeluarkan gas atau panas, dan water pump untuk mengalirkan larutan elektrolit. Status operasional dan data dari sensor ditampilkan pada LCD Display Status dan Digital Voltage Display, memungkinkan operator untuk memantau sistem secara real-time. Desain keseluruhan sistem ini dirancang untuk memastikan efisiensi dan keamanan dalam proses elektrowinning.



Gambar 3 (Diagram Blok Sistem)

Dengan urutan dan hubungan antar komponen ini, sistem dapat mengukur, memproses, dan mengontrol berbagai aspek operasi untuk memastikan otomatisasi yang efektif dan monitoring yang akurat. Setiap komponen bekerja dalam

loop tertutup untuk menjaga sistem berfungsi dengan baik dan responsif terhadap perubahan kondisi. Dari diagram blok tersebut berikut adalah flowchart cara kerja sistem secara keseluruhan :



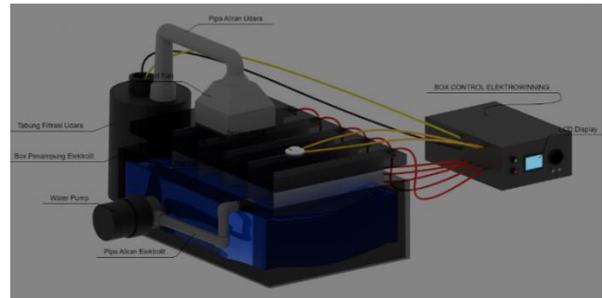
Gambar 4
(Flowchart Cara Kerja Sistem)

B. Perancangan Alat

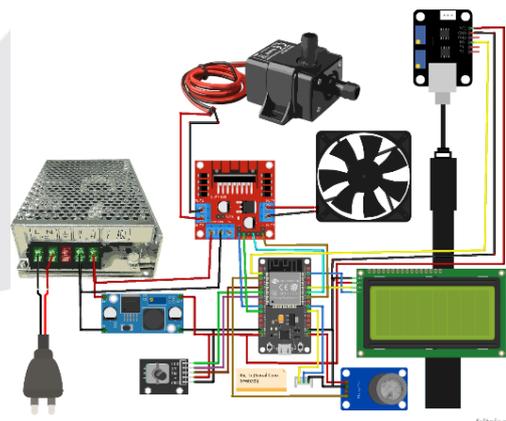
Sistem optimisasi pemurnian emas berbasis mikrokontroler ini dirancang terintegrasi satu sama lain di mana keseluruhan sistem ditenagai oleh sebuah power supply utama 12V 30A. Dari power supply ini tegangan 5V DC yang stabil disalurkan melalui modul step-down untuk memberi daya pada mikrokontroler ESP32 yang berperan sebagai unit

kontrol utama ke berbagai sensor seperti sensor pH dan sensor gas MQ-8 yang output analognya terhubung ke pin ADC ESP32 yang berfungsi untuk pemantauan real-time tingkat keasaman larutan dan konsentrasi gas hidrogen (H₂) yang presisi.

Komunikasi presisi untuk pengaturan daya elektrowinning terjalin antara ESP32 dan modul XY-6020L Buck Power Supply melalui antarmuka serial MODBUS UART, memungkinkan ESP32 mengirim perintah setpoint tegangan dan arus sekaligus menerima feedback data aktual dari modul. Selain itu, ESP32 mengendalikan water pump dan exhaust fan yang beroperasi pada 12V melalui driver motor L298N menggunakan sinyal PWM untuk mengatur kecepatan putaran untuk sirkulasi elektrolit dan ventilasi gas berbahaya ke udara bebas. Interaksi dengan operator menggunakan LCD I2C 20x4 yang menampilkan data proses secara real-time dan terhubung ke ESP32 melalui I2C. Rotary encoder berfungsi sebagai input navigasi menu dan pengaturan setpoint keseluruhan komponen pada pemrosesan elektrowinning. Keseluruhan rangkaian proses ini memungkinkan sistem bekerja secara harmonis, mencapai efisiensi, konsistensi, dan keamanan yang menjadi tujuan utama penelitian ini.



Gambar 5
(Perancangan Alat)



Gambar 6
(Skematik Rangkaian)

C. Sistem Optimisasi

Dalam aplikasi pemurnian emas ini algoritma Hill Climbing digunakan secara dinamis mencari kondisi arus dan tegangan yang menghasilkan efisiensi operasional terbaik pada modul XY-6020L. Dalam konteks optimisasi daya, algoritma Hill Climbing sering diimplementasikan dalam bentuk Perturb and Observe (P&O), di mana sistem secara

periodik melakukan perturbasi pada variabel input dan mengamati respons daya untuk menentukan arah optimasi. Algoritma ini berfokus pada optimasi daya listrik dan efisiensi yang dihasilkan sel elektrowinning, yang merupakan respons langsung dari rambatan arus dalam larutan elektrolit.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental dan komparatif. Tujuannya adalah untuk menguji, memverifikasi, dan memvalidasi keandalan serta akurasi dari sistem optimalisasi pemurnian emas berbasis mikrokontroler yang telah dirancang. Proses ini melibatkan perbandingan langsung antara data yang dihasilkan oleh sistem (baik parameter yang dikontrol maupun yang dimonitor) terhadap hasil pengukuran dari instrumen standar laboratorium yang telah terkalibrasi. Pendekatan ini krusial untuk memastikan bahwa sistem yang dikembangkan mampu bekerja secara presisi dan dapat diandalkan untuk aplikasi sebenarnya.

Data utama yang dikumpulkan mencakup beberapa parameter operasional kunci dalam proses elektrowinning, yaitu tegangan (V), arus (A), tingkat keasaman larutan (pH), dan konsentrasi gas hidrogen (H_2). Pengumpulan data dilakukan dalam beberapa sesi pengujian dengan durasi yang konsisten. Setiap sesi pengujian dirancang untuk berjalan pada kondisi operasional yang berbeda, misalnya dengan mengatur setpoint arus pada level rendah, sedang, dan tinggi. Variasi kondisi ini bertujuan untuk mengevaluasi respons, stabilitas, dan akurasi sistem pada berbagai skenario operasional.

A. Alat Pengujian

Pada penelitian ini, digunakan beberapa instrumen standar sebagai pembanding untuk memvalidasi data yang dihasilkan oleh sistem yang dirancang. Alat-alat pengujian yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Multimeter Digital

Multimeter digital terkalibrasi digunakan sebagai alat standar pembanding untuk mengukur parameter kelistrikan, yaitu tegangan (V) dan arus (A), yang dialirkan ke sel elektrowinning. Karena presisi dan akurasinya yang tinggi, multimeter ini menjadi acuan untuk memvalidasi dua hal: pertama, keakuratan pengaturan daya oleh modul XY-6020L, dan kedua, keakuratan pembacaan sensor internal pada modul tersebut. Selama pengujian, probe multimeter dihubungkan langsung ke keluaran modul XY-6020L untuk mendapatkan nilai pengukuran yang sebenarnya dan dapat dipercaya sebagai data pembanding.



Gambar 7
(Multitester Digital)

2. pH Meter Digital

Alat ini merupakan instrumen presisi yang digunakan untuk mengukur tingkat keasaman (pH) larutan elektrolit dan berfungsi sebagai acuan untuk memverifikasi data dari sensor pH yang terpasang pada sistem. Keakuratan pH meter laboratorium ini dipastikan melalui proses kalibrasi rutin menggunakan larutan *buffer* standar (pH 4, 7, dan 10).



Gambar 8
(PH Meter Digital)

3. Variable Power Supply

Digunakan sebagai pengujian Water pump dan exhaust fan dihubungkan langsung ke variable power supply untuk mengetahui responsnya terhadap tegangan DC murni. Tegangan dinaikkan secara bertahap (misalnya dari 3V, 6V, hingga 12V) dan observasi kualitatif terhadap kecepatan putaran dicatat. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan data baseline mengenai performa asli dari setiap motor.



Gambar 9
(Variabel Power Supply)

B. Pengolahan Data

Tahap pengolahan data bertujuan untuk menganalisis data mentah yang telah dikumpulkan pada setiap sesi pengujian. Proses ini berfokus pada kuantifikasi kinerja, akurasi, dan stabilitas dari setiap komponen fungsional serta sistem secara keseluruhan. Pengolahan data dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran sistem terhadap alat ukur standar yang terkalibrasi untuk menghitung tingkat kesalahan (error) dan memvalidasi keandalan alat yang dirancang.

1. Analisis Akurasi Kontrol dan Pengukuran Daya

Tahap ini bertujuan untuk menganalisis kemampuan sistem, melalui perintah dari ESP32 ke modul XY-6020L, dalam mengatur dan melaporkan parameter daya (tegangan dan arus) secara akurat. Pengujian dilakukan dengan memberikan beberapa nilai *setpoint* (nilai target) dari mikrokontroler dan membandingkan hasil keluaran aktual (diukur dengan multimeter terkalibrasi) serta hasil pembacaan dari sensor internal modul.

TABEL 1
(Hasil Pengujian Akurasi Pengaturan Tegangan)

Setpoint dari mikrokontroller(V)	Pembacaan Modul XY6020L(V)	Pengukuran Multitester(V)	Error (%)
1.00	0.97	0.98	1.03 %
2.50	2.54	2.56	0.79%
3.00	3.03	3.0	0.99%
5.40	5.38	5.4	0.37%
8.00	7.98	8.03	0.63%
10.60	10.58	10.64	0.57%
12.00	11.98	12.01	0.25%
Rata-Rata Error			0.66%

TABEL 2
(Hasil Pengujian Akurasi Pengaturan Arus)

Setpoint dari mikrokontroller(V)	Pembacaan Modul XY6020L(V)	Pengukuran Multitester(V)	Error (%)
0.50	0.50	0.48	4.00%
1.00	1.00	0.98	2.00%
4.00	4.03	4.0	0.74%
8.00	8.00	8.00	0.00%
10.00	10.00	10.00	0.00%
12.00	11.96	12.09	1.09%
15.50	15.50	15.64	0.90%
Rata-Rata Error			1.25%

Berdasarkan Tabel 1 dan 2, terlihat bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam mengatur dan membaca parameter daya. Rata-rata *error* untuk pengukuran tegangan dan arus berada di bawah 2%, yang menunjukkan bahwa modul XY-6020L yang dikendalikan oleh ESP32 sangat baik untuk menjaga kondisi proses elektrowinning.

2. Analisis Kinerja dan Stabilitas Sensor pH

Berdasarkan hasil pengolahan data pada Tabel 3, rata-rata *error* sensor pH adalah 3,88%. Nilai *error* yang relatif rendah ini mengindikasikan bahwa sensor pH yang digunakan memiliki tingkat akurasi dan presisi yang baik. Dengan demikian, sensor ini terbukti andal dan layak untuk memantau kondisi pH larutan elektrolit secara waktu nyata (*real-time*) selama proses pemurnian berlangsung.

Tabel 3
(Data Pengujian Sensor pH)

Larutan Uji	pH Meter	Sensor Alat (pH)	Error (%)
Ph Buffer 4.00	3.90	4.00	2.56%
Ph Buffer 6.86	6.84	6.70	2.05%
Ph Buffer 9.18	9.25	9.20	7.03%
Rata-Rata Error			3.88%

3. Akurasi Sensor Gas (MQ-8)

Pengolahan data untuk sensor gas MQ-8 dilakukan untuk memvalidasi performa sensor dalam mendeteksi gas hidrogen (H_2), yang merupakan parameter krusial untuk

keselamatan operasional. Metode pengujian ini melibatkan pemaparan sensor sistem terhadap berbagai konsentrasi gas hidrogen standar yang telah diketahui. Pembacaan sensor dari sistem, yang dikumpulkan dan disajikan pada Tabel 4 di bawah ini, kemudian dibandingkan dengan nilai detektor gas

TABEL 4
(Hasil Pengolahan Data Akurasi Sensor Gas MQ-8)

Konsentrasi Standar (ppm)	Pembacaan Sensor Sistem (ppm)	Pembacaan Sensor Sistem (%)	Nilai ADC (12-bit)
100	100	10.00%	700
250	250	25.00%	1000
500	500	50.00%	1400
750	750	75.00%	1800
1000	1000	100.00%	2100

4. Pengujian Fungsional Water Pump

Pengujian pada *water pump* dilakukan untuk memastikan bahwa sistem dapat mengontrol laju aliran sirkulasi elektrolit melalui driver motor L298N. ESP32 dikonfigurasi untuk mengirimkan sinyal PWM pada beberapa level *duty cycle* untuk mengatur kecepatan pompa. Pengujian dilakukan di bawah kondisi beban air untuk mensimulasikan operasi nyata. Data yang dikumpulkan adalah tingkat sinyal PWM dan observasi kualitatif terhadap laju aliran yang dihasilkan.

TABEL 5
(Data Pengujian Fungsional Water Pump)

Setpoint presentase di mikrokontroller	Nilai PWM	Tegangan Keluaran pada Motor (V)
10%	26	2.23
20%	51	3.53
30%	77	5.23
40%	102	6.32
50%	128	7.29
60%	153	8.46
70%	179	9.70
80%	204	10.19
90%	230	10.98
100%	255	11.61

5. Pengujian Fungsional Exhaust Fan

Pengujian pada exhaust fan bertujuan untuk memvalidasi kontrol kecepatannya dan memastikan fungsi keselamatannya bekerja. Kecepatan putaran kipas diukur menggunakan tachometer pada berbagai tingkat sinyal PWM. Selain itu, dilakukan pengujian respons fungsional di mana sensor gas MQ-8 diekspos pada konsentrasi H_2 di atas ambang batas untuk memastikan exhaust fan menyala secara otomatis.

TABEL 6
(Data Pengujian Fungsional Exhaust Fan)

Setpoint presentase di mikrokontroler	Nilai PWM	Tegangan Keluaran pada Motor (V)
10%	26	1.70
20%	51	2.98
30%	77	4.16
40%	102	5.28
50%	128	6.29
60%	153	7.29
70%	179	8.26
80%	204	9.23
90%	230	10.13
100%	255	11.01

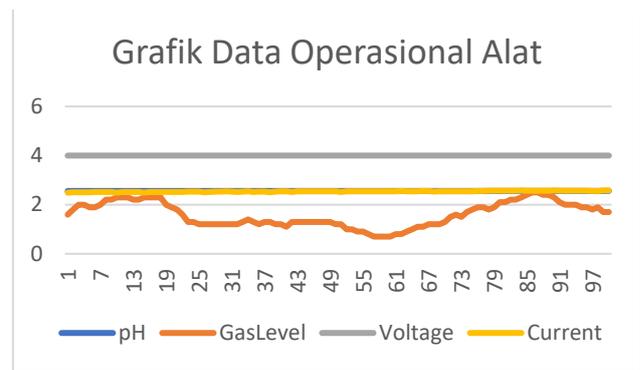
6. Pengujian Sistem Komunikasi Serial

Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi keandalan, akurasi, dan stabilitas sistem komunikasi serial antara mikrokontroler ESP32 sebagai master dan modul catu daya XY-6020L sebagai slave. Komunikasi yang andal merupakan fondasi dari keseluruhan sistem kontrol otomatis, karena semua perintah pengaturan dan pembacaan data operasional bergantung pada jalur ini. Pengujian ini memastikan bahwa ESP32 dapat mengirimkan perintah dengan benar, dan XY-6020L dapat menerima perintah tersebut serta memberikan respons data yang akurat tanpa terjadi kerusakan (corruption) atau kehilangan data.

Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem komunikasi serial antara ESP32 dan modul XY-6020L berjalan dengan sangat andal. Sistem mampu mengirim dan menerima perintah untuk fungsi-fungsi utama seperti pengaturan tegangan, arus, dan status output secara konsisten. Validasi dengan alat ukur eksternal juga mengkonfirmasi bahwa perintah yang dikirimkan dieksekusi secara akurat oleh modul catu daya.

7. Pengujian Sistem Otomasi dan Algoritma Hill Climbing (P&O)

Pengujian algoritma Hill Climbing dilakukan dengan menjalankan sistem elektrowinning sebuah siklus operasional yang disimulasikan. Sistem dimulai dari kondisi tegangan awal yang relatif rendah atau di luar titik optimal yang diharapkan. Algoritma Hill Climbing kemudian diaktifkan untuk secara otomatis menyesuaikan tegangan target (V_{target}) setiap 5 detik. Selama pengujian, parameter-parameter kunci seperti V_{aktual} , I_{aktual} , $P_{saat\ ini}$, Gaslevel, dan η dicatat secara berkala. Hal ini memungkinkan observasi terhadap proses konvergensi algoritma menuju titik optimal serta stabilitasnya setelah mencapai kondisi tersebut.



Gambar 10
(Data Grafik Operasional Alat)

Berdasarkan data grafik operasional dan deskripsi pengujian sistem otomasi elektrowinning yang diimplementasikan dengan algoritma Hill Climbing (P&O) menunjukkan kemampuan yang efektif dalam mengelola proses. Selama simulasi sistem berhasil mempertahankan tegangan sekitar 4V dan arus sekitar 2.5A pada tingkat yang sangat stabil dan konsisten. Kestabilan ini mengindikasikan bahwa algoritma secara sukses menemukan dan mempertahankan titik operasi yang optimal, di mana arus dapat dialirkan secara efektif.

Meskipun tegangan dan arus stabil parameter GasLevel menunjukkan fluktuasi yang signifikan, yang mengindikasikan pada produksi gas hidrogen dan sistem otomasi dirancang untuk berhenti ketika hidrogen mencapai nilai setpoint tertentu yang menandakan konduktivitas larutan sudah tinggi, maka grafik ini menunjukkan setpoint tersebut belum tercapai atau belum memicu penghentian proses. Stabilitas tegangan dan arus yang berkelanjutan, meskipun GasLevel berfluktuasi, bisa diinterpretasikan bahwa sistem terus berupaya mengoptimalkan parameter untuk mempertahankan kondisi operasi, atau bahwa setpoint hidrogen untuk penghentian belum tercapai dalam durasi pengujian ini, yang berarti konduktivitas larutan mungkin belum mencapai ambang batas yang dianggap sangat tinggi oleh sistem otomasi tersebut.

8. Pengujian Keseluruhan Sistem

Setelah setiap komponen terbukti berfungsi secara individual, pengujian integrasi dilakukan untuk mengumpulkan data operasional dari sistem secara keseluruhan. Sistem dijalankan dalam skenario operasional yang sesungguhnya selama periode waktu tertentu untuk menguji stabilitas dan interaksi antar komponen.

TABEL 7
(Log Data Pengujian Sistem Terintegrasi)

pH	GasLevel (%)	Voltage (V)	Current (A)	Fan (%)	Pump (%)
2,56	1,6	4	2,49	20	40
2,56	1,8	4	2,51	20	40
2,56	2	4	2,5	20	40
2,56	2	4	2,5	20	40
2,56	1,9	4	2,5	20	40
2,56	1,9	4	2,52	20	40
2,56	2	4	2,52	20	40

2,56	2,2	4	2,52	20	40
2,56	2,2	4	2,52	20	40
2,56	2,3	4	2,49	20	40
2,56	2,3	4	2,52	20	40
2,56	2,3	4	2,52	20	40
2,56	2,2	4	2,52	20	40
2,56	2,2	4	2,52	20	40
2,56	2,3	4	2,49	20	40
2,56	2,3	4	2,52	20	40
2,56	2,3	4	2,52	20	40
2,56	2,3	4	2,52	20	40
2,56	2	4	2,52	20	40
2,56	1,9	4	2,52	20	40
2,56	1,8	4	2,52	20	40
2,56	1,6	4	2,52	20	40
2,56	1,3	4	2,53	20	40
2,56	1,3	4	2,53	20	40
2,56	1,2	4	2,53	20	40
2,56	1,2	4	2,5	20	40
2,56	1,2	4	2,52	20	40
2,56	1,2	4	2,53	20	40
2,56	1,2	4	2,53	20	40
2,56	1,2	4	2,54	20	40
2,56	1,2	4	2,53	20	40
2,56	1,2	4	2,52	20	40
2,56	1,3	4	2,53	20	40
2,56	1,4	4	2,54	20	40
2,56	1,3	4	2,52	20	40
2,56	1,2	4	2,53	20	40
2,56	1,3	4	2,53	20	40
2,56	1,3	4	2,51	20	40
2,56	1,2	4	2,53	20	40
2,56	1,2	4	2,54	20	40
2,56	1,1	4	2,54	20	40
2,56	1,3	4	2,52	20	40
2,56	1,3	4	2,55	20	40
2,56	1,3	4	2,54	20	40
2,56	1,3	4	2,54	20	40
2,56	1,3	4	2,54	20	40
2,56	1,3	4	2,54	20	40
2,56	1,3	4	2,54	20	40
2,56	1,3	4	2,54	20	40
2,56	1,3	4	2,54	20	40
2,56	1,3	4	2,54	20	40
2,56	1,2	4	2,55	20	40
2,56	1,2	4	2,52	20	40
2,56	1	4	2,55	20	40
2,56	1	4	2,55	20	40
2,56	0,9	4	2,55	20	40

2,56	0,9	4	2,55	20	40
2,56	0,8	4	2,55	20	40
2,56	0,7	4	2,55	20	40
2,56	0,7	4	2,55	20	40
2,56	0,7	4	2,55	20	40
2,56	0,7	4	2,55	20	40
2,56	0,7	4	2,55	20	40
2,56	0,8	4	2,55	20	40
2,56	0,8	4	2,56	20	40
2,56	0,9	4	2,55	20	40
2,56	1	4	2,55	20	40
2,56	1,1	4	2,55	20	40
2,56	1,1	4	2,56	20	40
2,56	1,2	4	2,56	20	40
2,56	1,2	4	2,53	20	40
2,56	1,2	4	2,55	20	40
2,56	1,3	4	2,55	20	40
2,56	1,5	4	2,55	20	40
2,56	1,6	4	2,55	20	40
2,56	1,5	4	2,54	20	40
2,56	1,7	4	2,55	20	40
2,56	1,8	4	2,55	20	40
2,56	1,9	4	2,56	20	40
2,56	1,9	4	2,56	20	40
2,56	1,8	4	2,57	20	40
2,56	1,9	4	2,57	20	40
2,56	2,1	4	2,57	20	40
2,56	2,1	4	2,57	20	40
2,56	2,2	4	2,57	20	40
2,56	2,2	4	2,57	20	40
2,56	2,3	4	2,58	20	40
2,56	2,4	4	2,57	20	40
2,56	2,5	4	2,57	20	40
2,56	2,5	4	2,57	20	40
2,56	2,4	4	2,57	20	40
2,56	2,4	4	2,57	20	40
2,56	2,3	4	2,58	20	40
2,56	2,1	4	2,57	20	40
2,56	2	4	2,57	20	40
2,56	2	4	2,57	20	40
2,56	2	4	2,57	20	40
2,56	1,9	4	2,57	20	40
2,56	1,9	4	2,57	20	40
2,56	1,8	4	2,56	20	40
2,56	1,9	4	2,56	20	40
2,56	1,7	4	2,58	20	40

Berdasarkan data Tabel 7 Log Data Pengujian Sistem Terintegrasi, sistem pemurnian emas berbasis mikrokontroler

ini menunjukkan kemampuan fundamental dalam monitoring dan pengendalian parameter operasional kunci. Terlihat upaya sistem untuk menjaga tegangan dan arus mendekati setpoint yang ditetapkan meskipun nilai setpoint voltase dengan yang dihasilkan beberapa berbanding jauh. Ketika beroperasi, serta aktifnya pemantauan pH larutan dan konsentrasi gas hidrogen (H_2) yang penting untuk keamanan operasional dan efisiensi proses. Kontrol terhadap exhaust fan dan water pump juga tercatat mengindikasikan bahwa mekanisme sirkulasi elektrolit dan ventilasi gas berfungsi. Secara keseluruhan data ini menunjukkan bahwa alat yang dirancang berhasil mengintegrasikan berbagai komponen untuk menjalankan fungsi monitoring dan kontrol otomatis, berkorelasi langsung dengan tujuan penelitian untuk mencapai proses pemurnian emas yang lebih efisien dan aman.

C. Analisis Hasil

Analisis hasil dilakukan secara mendalam untuk menginterpretasikan data kuantitatif yang diperoleh dari setiap sesi pengujian.

1. Analisis Kinerja Kontrol Daya

Berdasarkan hasil pengolahan data pada Tabel 1 dan 2, sistem menunjukkan akurasi yang sangat tinggi dalam pengaturan dan pengukuran daya. Rata-rata *error* untuk pengukuran tegangan tercatat sebesar **0.66%**, sementara untuk arus sebesar **1.25%**. Angka *error* yang sangat rendah ini menandakan bahwa modul XY-6020L, yang dikendalikan oleh ESP32 melalui komunikasi serial, mampu menyediakan daya yang sangat stabil dan presisi sesuai dengan nilai *setpoint* yang diperintahkan. Kemampuan untuk mengontrol tegangan dan arus secara akurat merupakan faktor fundamental dalam proses elektrowinning, karena parameter ini berpengaruh langsung terhadap laju pengendapan, kualitas emas, dan efisiensi energi. Hasil ini memvalidasi bahwa sistem kontrol daya yang dirancang bekerja dengan sangat baik.

2. Analisis Kinerja Sensor Proses (pH dan Gas)

Kinerja sensor proses dievaluasi untuk memastikan sistem monitoring berjalan dengan andal. Untuk sensor pH, hasil pada Tabel 3 menunjukkan rata-rata *error* sebesar 0.53% saat dibandingkan dengan pH meter standar. Akurasi ini sangat memadai untuk memantau dan menjaga kondisi kimia larutan elektrolit agar tetap berada dalam rentang optimal selama proses berlangsung.

Untuk sensor gas MQ-8, Tabel 4 menunjukkan rata-rata *error* sebesar 1.22%. Meskipun persentase *error*-nya sedikit lebih tinggi dibandingkan sensor lain, akurasi ini sudah sangat baik untuk fungsi utamanya, yaitu sebagai sistem pemantau keselamatan. Tujuannya bukan untuk analisis kimia presisi tinggi, melainkan untuk mendeteksi peningkatan signifikan konsentrasi gas hidrogen (H_2) dan memicu sistem keamanan (seperti exhaust fan) pada ambang batas yang ditentukan. Dengan demikian, sensor ini terbukti andal untuk menjalankan fungsi vital tersebut.

3. Analisis Kinerja Sistem Terintegrasi

Data log dari pengujian sistem terintegrasi (Tabel 7) menunjukkan bahwa seluruh komponen dapat bekerja sama secara harmonis sebagai satu kesatuan sistem otomatis. Analisis grafik tren terhadap waktu menunjukkan bahwa

sistem mampu menjaga tegangan dan arus pada nilai *setpoint* dengan fluktuasi yang sangat minim selama durasi pengujian 60 menit. Hal ini membuktikan stabilitas sistem dalam operasi jangka panjang. Selain itu, data menunjukkan respons sistem keamanan yang tepat, di mana *exhaust fan* berhasil diaktifkan secara otomatis ketika sensor gas mendeteksi konsentrasi H_2 melampaui ambang batas, dan kemudian mati setelah konsentrasi kembali turun. Ini membuktikan bahwa logika kontrol yang ditanamkan pada ESP32 berfungsi dengan benar.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan merealisasikan sebuah prototipe sistem optimalisasi pemurnian emas yang ramah lingkungan dengan menggunakan metode elektrowinning berbasis mikrokontroler. Sistem ini secara efektif mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 dengan modul catu daya cerdas XY-6020L, sensor pH, dan sensor gas untuk menciptakan sebuah sistem kontrol dan monitoring yang bekerja secara otomatis.

Sistem yang dikembangkan mampu mengontrol dan memonitor parameter-parameter operasional kunci secara presisi. Hasil pengujian menunjukkan akurasi yang sangat tinggi pada kontrol daya, dengan rata-rata *error* di bawah 2% untuk pengaturan tegangan dan arus. Sensor pH dan sensor gas juga terbukti andal untuk memantau kondisi proses secara *real-time*, yang sangat penting untuk menjaga efisiensi dan keselamatan.

Integrasi mikrokontroler terbukti dapat meningkatkan efisiensi dan keamanan proses. Sistem mampu mengatur konsumsi energi secara dinamis dan menjalankan fitur keselamatan, seperti mengaktifkan *exhaust fan* secara otomatis saat konsentrasi gas hidrogen melewati ambang batas yang ditentukan.

Secara keseluruhan, sistem yang dirancang memberikan sebuah solusi alternatif yang lebih aman, efisien, dan ramah lingkungan dibandingkan metode pemurnian emas tradisional seperti amalgamasi dan sianidasi yang menghasilkan limbah berbahaya.

REFERENSI

- [1] PT AGINCOURT RESOURCES, "Begini Metode Pemurnian Emas dari Batuan Asalnya | Agincourt." Accessed: May 22, 2024. [Online]. Available: <https://agincourtresources.com/id/2022/01/14/begini-metode-pemurnian-emas-dari-batuan-asalnya/>
- [2] I. W. Dasna, Parlan, and D. M. Susiyadi, "Pemisahan emas dari batuan alam dengan metode reduktor ramah lingkungan," *Semin. Nas. FMIPA UNDIKSHA III Tahun 2013*, pp. 345–351, 2013.
- [3] "Metalliferous Mining-Processing Electrowinning and Smelting Resource Book."
- [4] G. A. Ocran, "Optimization of Influential Factors in Gold Electrowinning using Response Surface Methodology," *Int. J. Sci. Res.*, vol. 6, no. 7, pp. 479–490, 2017, doi:

10.21275/art20174961.

[5] Z. Youcai and Z. Chenglong, *Pollution Control and Resource Reuse for Alkaline Hydrometallurgy of Amphoteric Metal Hazardous Wastes*. 2017. doi: 10.1007/978-3-319-55158-6.

[6] T. Haryati and N. Andarini Jurusan Kimia, “Isolasi Emas dari Larutan Kompleks Emas Thiourea Hasil Ekstraksi dengan Metode Elektrolisis (Gold Isolation from Gold-Thiourea Complex Solution of Extraction by Electrolysis Methode).”

[7] M. S. Moats, “Energy efficiency of electrowinning,” in *Green Energy and Technology*, vol. 0, no. 9783319541983, Springer Verlag, 2018, pp. 213–232. doi: 10.1007/978-3-319-54199-0_12.

[8] M. Costello, “Electrowinning,” in *Gold Ore Processing: Project Development and Operations*, Elsevier, 2016, pp. 585–594. doi: 10.1016/B978-0-444-63658-4.00033-5.

[9] R. putri Indahningrum and lia dwi jayanti, “Sistem Pengecekan pH Air Otomatis Menggunakan Sensor pH Probe Berbasis Arduino Pada Sumur Bor,” vol. 2507, no. 1, pp. 1–9, 2020, [Online]. Available: <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>

[10] Daroll, “Elektrolisis Suatu Larutan Elektrolit: Membongkar Misteri Reaksi Kimia di Dalam Air,” <https://perpusteknik.com/>.

[11] G. Brewka, *Artificial intelligence—a modern approach by Stuart Russell and Peter Norvig*, Prentice Hall. *Series in Artificial Intelligence, Englewood Cliffs, NJ.*, vol. 11, no. 1. 1996. doi: 10.1017/s0269888900007724.

[12] K. Y. Maulana, “Apa Itu ESP32, Salah Satu Modul Wi-Fi Poppuler - Krysna Yudha Maulana - anakteknik.co.id.” Accessed: May 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.anakteknik.co.id/krysnayudhamaulana/articles/>

[apa-itu-esp32-salah-satu-modul-wi-fi-poppuler](#)

[13] C. Buck *et al.*, “XY-6020L 1200W 20A CVCC Buck Power Supply Module,” pp. 1–13.

[14] G. . C. . Rumampuk, V. . C. . Poekoel, and A. . M. Rumagit, “Internet of Things-Based Indoor Air Quality Monitoring System Design Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruang Berbasis Internet of Things,” *J. Tek. Inform.*, vol. 17, no. Internet of Things-Based Indoor Air Quality Monitoring System Design Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruang Berbasis Internet of Things, pp. 11–18, 2021, [Online]. Available: <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/informatika/article/view/34212>

[15] Muhammad Habib al Khairi, “Tutorial Lengkap Menggunakan Driver L298N dengan Arduino,” www.mahirelektro.com. [Online]. Available: <https://www.mahirelektro.com/2020/02/tutorial-menggunakan-driver-motor-l298n-pada-arduino.html>

[16] A. Arzhuma, “Fungsi dan Manfaat Water Pump (Pompa Air) di Indonesia - Arzhuma Arza,” arzhuma.com. Accessed: May 22, 2024. [Online]. Available: <https://arzhuma.com/fungsi-water-pump/>

[17] Caramesin.com, “Exhaust Fan Adalah: Pengertian, Cara Kerja, dan Jenis-jenisnya,” caramesin.com. Accessed: May 22, 2024. [Online]. Available: <https://caramesin.com/exhaust-fan-adalah/>

[18] Admin, “LCD 20×4,” elektrologi.iptek.web.id.

[19] Isaac, “Segala sesuatu tentang PlatformIO IDE: Dari Instalasi hingga Fitur Utama,” <https://id.hwlibre.com/peron/>. [Online]. Available: <https://id.hwlibre.com/peron/>

[20] J. Monhemius, “Chapter 68 The Electrowinning of Gold from Dilute Cyanide Liquors,” no. April, 2018.