

# *Implementation of DC Motor Driver in Autoclave Reactor in Nickel Laterite Ore Processing*

## *Implementasi Driver Motor DC Pada Reaktor Autoclave Pada Pemrosesan Nikel Laterite Ore*

Moh. Afandy  
Prodi Teknik Listrik dan Instalasi  
Politeknik Industri Logam  
Morowali  
Morowali, Indonesia  
Fandhymoh@gmail.com

Muhammad Ikbal Rianto  
Prodi Teknik Listrik dan Instalasi  
Politeknik Industri Logam  
Morowali  
Morowali, Indonesia  
Ikbal@pilm.com

Abdul Haris Mubarak  
Prodi Teknik Listrik dan Instalasi  
Politeknik Industri Logam  
Morowali  
Morowali, Indonesia  
haris080686@gmail.com

Diterima : Mei 2025  
Disetujui : Juli 2025  
Dipublikasi : Juli 2025

**Abstrak**— Penelitian ini bertujuan untuk merancang serta menguji sistem monitoring kecepatan motor DC pada proses pengadukan larutan asam dan Nikel Laterite ore dalam tabung reaktor Autoclave. Sistem kontrol menggunakan sinyal PWM (Pulse Width Modulation) dengan *duty cycle* konstan sebesar 100% yang diberikan pada rangkaian driver motor DC topologi H-Bridge berbasis MOSFET. Penentuan *duty cycle* didasarkan pada putaran RPM pengaduk pada tangka reactor dengan pengujian bertingkat dari 10 % - 100%. Pengujian dilakukan dalam dua kondisi proses pengolahan, masing-masing dengan konsentrasi asam 4% dan 5%, untuk mengevaluasi performa sistem terhadap variasi beban viskositas. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan kestabilan kecepatan putar motor dalam rentang pemrosesan nikel dengan kadar larutan pelindi 4% dan 5% dengan kecepatan rata-rata 193 RPM, meskipun terdapat peningkatan beban akibat konsentrasi larutan. Kinerja rangkaian driver terbukti efektif dalam mendistribusikan daya secara kontinu tanpa gejala *overheat* atau gangguan *switching*, serta mampu melindungi sistem dari efek tegangan balik. Proses pencampuran menunjukkan hasil homogen dengan efisiensi pengadukan yang memadai pada kedua kondisi larutan. Hasil akhir berupa cairan filtrate dan sisa residu diperoleh dari valuasi proses. Sistem monitoring dan driver motor DC yang dirancang telah menunjukkan performa andal dalam aplikasi pengadukan reaktor skala laboratorium dengan system local monitor, serta berpotensi dikembangkan lebih lanjut menuju sistem kontrol adaptif berbasis sensor umpan balik untuk efisiensi energi dan system monitoring dan control jarak jauh.

**Kata kunci:** *Motor DC; Driver H-Bridge; PWM; Pengadukan Reactor Autoclave; Monitoring Kecepatan.*

**Abstract**— This study aims to design and test a DC motor speed monitoring system in the process of stirring acid solution and Nickel Laterite ore in an Autoclave reactor tube. The control system uses a PWM (Pulse Width Modulation) signal with a constant duty cycle of 100% which is given to the MOSFET-based H-Bridge topology DC motor driver circuit. The determination of

the duty cycle is based on the RPM rotation of the stirrer in the reactor tank with a multilevel test from 10% - 100%. Testing was carried out in two processing conditions, each with an acid concentration of 4% and 5%, to evaluate system performance against variations in viscosity load. The results of the study showed that the system was able to maintain the stability of the motor rotation speed in the nickel processing range with a leach solution content of 4% and 5% with an average speed of 193 RPM, even though there was an increase in load due to the concentration of the solution. The performance of the driver circuit proved effective in distributing power continuously without symptoms of *overheating* or *switching interference*, and was able to protect the system from the effects of reverse voltage. The mixing process showed homogeneous results with adequate stirring efficiency in both solution conditions. The final result in the form of filtrate liquid and residual residue is obtained from the process evaluation. The monitoring system and DC motor driver designed have shown reliable performance in laboratory-scale reactor stirring applications with a local monitor system, and have the potential to be further developed into an adaptive control system based on feedback sensors for energy efficiency and a remote monitoring and control system.

**Keywords**— *DC Motor; H-Bridge Driver; PWM; Autoclave Reactor Stirring; Speed Monitoring.*

### I. PENDAHULUAN

Pengolahan bijih nikel laterit (*laterite ore*) merupakan salah satu tantangan penting dalam industri ekstraksi logam karena komposisinya yang kompleks dan kandungan air yang tinggi. Pengolahan bijih nikel laterit (*laterite ore*) saat ini menjadi salah satu fokus utama dalam industri pertambangan logam karena cadangannya yang melimpah dan perannya yang sangat penting dalam penyediaan bahanbaku untuk baterai kendaraan listrik [1].

Salah satu metode yang umum digunakan dalam proses pengolahan laterite ore yaitu *High Pressure Acid Leaching* (HPAL) dengan memanfaatkan reaktor autoclave untuk mengekstraksi nikel dari bijih laterit menggunakan larutan

asam pada tekanan dan temperatur tinggi [2]. Keberhasilan proses ini sangat dipengaruhi oleh efisiensi perpindahan massa dan panas dalam larutan, yang sangat tergantung pada kualitas dan dinamika pengadukan di dalam reaktor [3].

Proses pengadukan bertujuan menciptakan distribusi suhu dan konsentrasi yang seragam, serta memastikan interaksi optimal antara partikel bijih dan larutan pelarut [4], [5]. Oleh karena itu, sistem pengadukan dengan pengendalian kecepatan yang tepat menjadi komponen penting. Dalam praktik industri, motor listrik, khususnya motor DC, banyak digunakan karena kemampuannya untuk merespons perubahan beban secara cepat dan mudah dikontrol kecepatan putarnya [6]. Salah satu metode kontrol yang umum dan efisien untuk mengatur kecepatan motor DC adalah *Pulse Width Modulation* (PWM) [7], [8].

PWM merupakan teknik pengaturan tegangan rata-rata yang diberikan ke motor melalui variasi lebar pulsa sinyal digital [9]. Teknik ini memungkinkan pengontrolan kecepatan motor secara halus dan efisien, yang sangat penting dalam proses industri seperti pengadukan di reaktor autoclave [7]. Beberapa studi telah mengeksplorasi penerapan PWM pada sistem otomasi dan robotika, serta dalam aplikasi proses manufaktur [10]. Namun, penelitian yang mengkaji penerapan pengontrolan PWM secara spesifik untuk proses pengadukan pada reaktor autoclave dalam konteks pengolahan bijih nikel laterit masih sangat terbatas.

Sebagian besar penelitian yang ada fokus pada aspek reaksi kimia dan parameter termodinamika dalam proses HPAL [11], [12], sedangkan kajian tentang sistem mekanik dan kontrol proses, khususnya dalam aspek pengadukan dinamis dengan kendali PWM, masih belum banyak dibahas secara mendalam [13], [14]. Selain itu, sebagian besar studi tentang kontrol motor DC dengan PWM dilakukan dalam kondisi lingkungan normal [15], bukan dalam sistem industri yang ekstrem seperti autoclave yang beroperasi pada suhu  $>200^{\circ}\text{C}$  dan tekanan  $>30$  bar.

Kekosongan inilah yang menjadi dasar pentingnya penelitian ini dilakukan, yaitu untuk mengembangkan sistem pengadukan berbasis motor DC dengan pengontrolan PWM yang dapat diintegrasikan pada sistem autoclave dan mampu beroperasi secara andal dalam kondisi ekstrem. Penelitian ini juga akan menjadi kontribusi baru dalam ranah otomasi industri ekstraktif yang masih minim kajian di bidang pengolahan nikel berbasis kendali motor cerdas.

Penelitian ini penting untuk dilakukan karena dapat meningkatkan efisiensi proses ekstraksi nikel yang berdampak langsung terhadap peningkatan rendemen logam, efisiensi energi, dan keseluruhan keberlanjutan operasional. Sistem pengadukan yang dapat dikendalikan secara presisi melalui PWM juga akan membuka jalan bagi penerapan sistem kendali berbasis control variatif jarak jauh dalam pengolahan sumber daya mineral berbasis laterit, mendukung transisi menuju industri pertambangan 4.0.

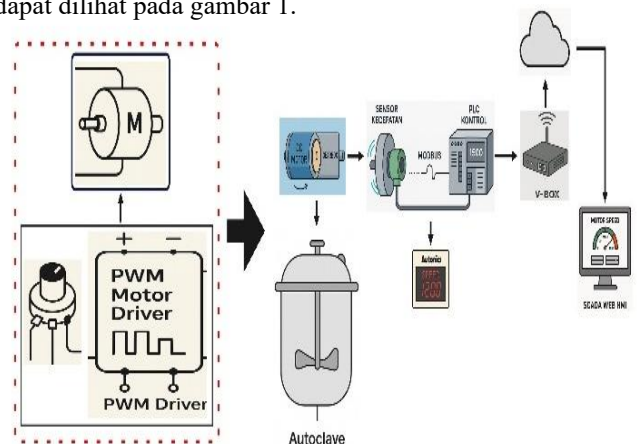
## II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium terkontrol untuk merancang dan menguji sistem pengadukan berbasis motor DC dengan kontrol PWM. Sistem akan dirancang menggunakan Driver motor untuk menghasilkan sinyal PWM, yang kemudian dapat dikontrol menggunakan PLC dengan komunikasi Modbus mengatur

kecepatan motor DC yang menggerakkan pengaduk dalam tabung reaktor autoclave.

### A. Perancangan Sistem

Dalam perancangan sistem pengontrolan motor DC pada tabung reaktor autoclave dilakukan untuk memastikan keandalan, efisiensi, dan stabilitas sistem dalam pengoperasian jangka panjang. Proses perancangan dimulai dengan identifikasi kebutuhan proses, yaitu mengatur kecepatan pengadukan secara presisi untuk menjaga homogenitas campuran bahan selama proses reaksi di dalam autoclave. Pengadukan yang tidak konsisten dapat menyebabkan reaksi tidak sempurna, penurunan kualitas produk, serta ketidakefisienan energi. Untuk dapat memahami alur perancangan system dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Perancangan Sistem dan Fokus Penelitian

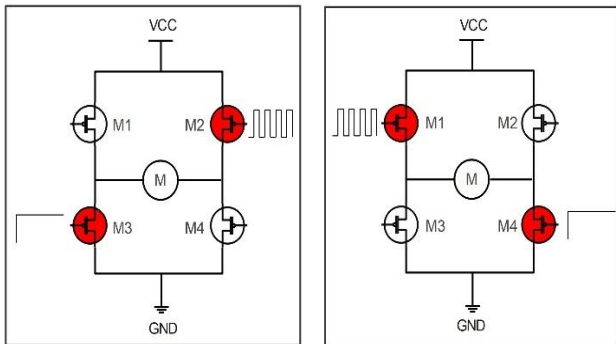
Dalam penelitian ini, pengaturan lebar pulsa PWM dilakukan melalui pembacaan sinyal analog dari potensiometer yang dikonversi oleh mikrokontroler menjadi sinyal digital dengan *duty cycle* bervariasi sesuai nilai tegangan input. Sinyal PWM ini kemudian digunakan untuk mengendalikan driver motor yang mengatur tegangan kerja motor DC secara proporsional terhadap lebar pulsa yang diberikan.

Untuk memantau dan menganalisis performa sistem, digunakan sensor kecepatan yang terintegrasi dengan Autonics Speed Display. Sensor ini berfungsi untuk mengukur putaran motor secara real-time dalam satuan RPM (rotation per minute). Nilai yang ditampilkan oleh speed display selanjutnya diakses dan ditransmisikan ke Programmable Logic Controller (PLC) menggunakan protokol komunikasi industri berbasis Modbus RTU. Komunikasi Modbus dipilih karena kemampuannya dalam mendukung komunikasi serial yang andal dan kompatibilitasnya yang luas dengan berbagai perangkat otomasi industri. PLC bertindak sebagai master yang secara periodik melakukan polling terhadap Autonics Speed Display (sebagai slave) untuk memperoleh data kecepatan aktual motor. Data ini kemudian diproses oleh PLC untuk keperluan pemantauan, penyimpanan, atau pengendalian lanjutan, seperti penyesuaian otomatis sinyal PWM berdasarkan feedback kecepatan (closed-loop control). Implementasi sistem ini memungkinkan pengendalian kecepatan motor DC yang lebih stabil dan responsif terhadap perubahan beban maupun gangguan eksternal. Selain itu, penggunaan komunikasi Modbus meningkatkan fleksibilitas sistem dalam

integrasi dengan sistem SCADA WEB HMI untuk kebutuhan monitoring dan kontrol secara real-time pada skala industri.

### B. Topology Rangkaian

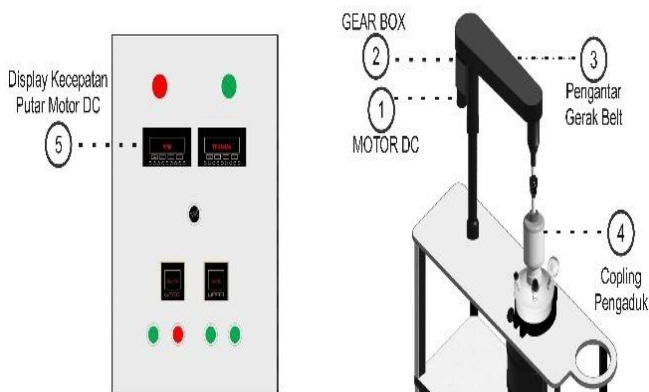
Topology rangkaian driver motor DC yang digunakan adalah rangkaian driver tipe H-Bridge dengan kemampuan mengontrol arah putaran motor 2 arah. PWM dengan *duty cycle* diberikan melalui salah satu sisi H-Bridge untuk memastikan tegangan maksimum diterapkan ke motor. Penggunaan MOSFET sebagai elemen saklar utama dipilih karena karakteristik switching yang cepat dan efisiensi daya yang tinggi, sehingga panas yang dihasilkan minimal meskipun bekerja dalam kondisi beban penuh. Untuk menghindari shoot-through atau kondisi di mana kedua MOSFET dalam satu kaki H-Bridge aktif bersamaan, sinyal PWM dikondisikan melalui rangkaian dead-time logic pada level kontrol. Pada gambar 2 dapat dilihat ilustrasi kerja dari MOSFET dimana ketika M2 aktif memberikan tegangan VCC ke motor maka M3 akan aktif high sehingga ground terhubung ke motor DC. Kondisi ini akan menghasilkan arah putaran motor CW atau searah jarum jam. Sedangkan kebalikan dari kondisi tersebut jika M1 terpicu PWM maka M4 akan memicu logika high dan memungkinkan motor untuk berputar CCW atau berlawanan arah jarum jam.



Gambar 2. Topology Rangkaian Driver Motor

Pada Sistem driver juga dilengkapi dengan flyback diode pada masing-masing terminal MOSFET untuk melindungi rangkaian dari tegangan balik atau back-EMF yang dihasilkan oleh motor saat berhenti mendadak atau saat beban berubah secara dinamis. Hal ini penting mengingat motor bekerja dalam lingkungan viskos dima larutan asam dengan ore yang memiliki kemungkinan fluktuasi beban mekanik, yang berpotensi menimbulkan lonjakan tegangan balik.

### C. Desain Alat Keseluruhan.



Gambar 3. Perancangan Sistem dan Fokus Penelitian

Gambar 2 memperlihatkan rancangan sistem penggerak pengaduk reaktor autoclave yang dikendalikan oleh motor DC dengan pengaturan kecepatan berbasis sinyal PWM. Rancangan ini mengintegrasikan sistem mekanik dan elektrik untuk menghasilkan pengadukan yang terkontrol dalam proses reaksi kimia bertekanan dan bersuhu tinggi.

#### 1. Motor DC

Motor DC berperan sebagai aktuator utama yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik putar. Kecepatan motor ini dikendalikan melalui sinyal PWM yang diatur oleh PLC berdasarkan masukan dari potensiometer analog. Pemilihan motor DC memungkinkan pengaturan kecepatan secara fleksibel dan responsif terhadap perubahan setpoint. Tegangan kerja motor DC dalam penelitian yaitu 24 VDC. Penyesuaian tegangan kerja motor DC disesuaikan dengan besaran tegangan yang dibutuhkan pada control PLC.

#### 2. Gearbox

Gearbox dipasang setelah motor DC untuk menurunkan kecepatan putaran dan meningkatkan torsi yang disalurkan ke sistem penggerak. Rasio gear yang digunakan disesuaikan dengan kebutuhan torsi pengadukan pada proses dalam reaktor autoclave. Dalam Penelitian ini rasio gearbox yang digunakan yaitu 1:58 dimana kecepatan putar dari motor DC mengalami peredaman sebesar 58 kali lebih lambat. Hal ini memungkinkan untuk menciptakan torsi yang besar pada sistem pengadukan. Penyesuaian kebutuhan torsi dan rasio dalam gearbox disesuaikan dengan beban material ore dan cairan pelindih berupa asam sulfat.

#### 3. Pengantar Gerak Belt (3)

Transmisi daya dari motor ke batang pengaduk dilakukan melalui sistem belt-pulley yang berfungsi sebagai pengantar gerak. Sistem ini memiliki keuntungan dalam mengurangi getaran, meningkatkan efisiensi transmisi, serta memudahkan pemeliharaan dan penggantian komponen. Pada transmisi penggerak dilengkapi dengan sensor pengukur kecepatan putar untuk mengambil data kecepatan putar pengadukan.

#### 4. Coupling Pengaduk

Coupling digunakan untuk menghubungkan poros transmisi dengan batang pengaduk yang masuk ke dalam reaktor. Desain coupling mempertimbangkan fleksibilitas gerak serta kemudahan perakitan dan pembongkaran selama proses pengolahan nikel ore laterit dan dalam proses pemeliharaan.

#### 5. Panel Kontrol dan Display

Panel kontrol terdiri atas beberapa indikator penting, antara klain yaitu indikator kecepatan motor (RPM), tekanan dalam reaktor, serta pengatur suhu dan heater. Tampilan digital memungkinkan operator untuk memantau dan mengontrol kondisi proses secara real time. Panel control juga berfungsi sebagai local monitoring kondisi pengadukan. Potensiometer digunakan untuk memberikan masukan nilai analog yang nantinya akan mempengaruhi kecepatan putar pengadukan.

Desain ini dirancang untuk mendukung sistem kendali tertutup, di mana nilai kecepatan putaran motor dapat dikontrol dan dimonitor secara presisi untuk memastikan homogenitas campuran dalam reaktor. Penggunaan komponen modular pada sistem ini juga memungkinkan pengembangan lebih lanjut untuk integrasi kendali otomatis berbasis sensor dan kontrol jarak jauh (remote monitoring).

#### D. Kendali Pulse Width Modulation (PWM)

Pengontrolan lebar pulse digunakan sebagai control utama dalam pengaturan frekuensi *Duty cycle*. Besaran kerja gelombang dengan amplitude disesuaikan dengan kebutuhan amplitude tegangan motor DC yang digunakan [16]. Penentuan frekuensi gelombang PWM pada kondisi 0% hingga mencapai kondisi 100% dapat dijelaskan berdasarkan persamaan berikut.

$$T_{total} = T_{on} + T_{off} \quad (1)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{off}} \quad (2)$$

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (3)$$

$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \times V_{in} \quad (4)$$

Dimana :

D = *Duty cycle* adalah lamanya pulsa high dalam satu perioda.

Ton = Waktu Pulsa "High".

Toff= Waktu Pulsa "Low".

#### E. Kalibrasi Sensor Kecepatan.

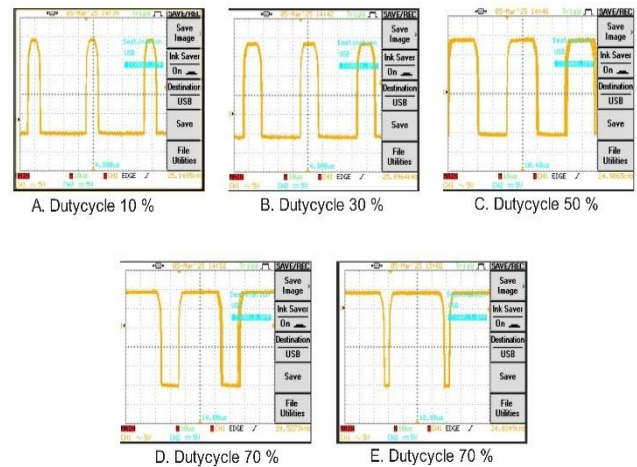
Dalam sistem pengontrolan kecepatan motor DC berbasis PWM yang dikembangkan, validasi data hasil pengukuran sangat penting untuk memastikan akurasi sistem. Oleh karena itu, dilakukan proses kalibrasi dengan membandingkan pembacaan kecepatan putaran motor (RPM) dari *pulse meter* yang terhubung ke Speed Display serta PLC, dengan alat ukur standar yaitu tachometer digital. Pengujian dilakukan dengan variasi *duty cycle* PWM dari 10% hingga 100% secara bertahap. Tabel 1 berikut memperlihatkan hasil pengukuran RPM dari kedua perangkat pada setiap variasi *duty cycle*, beserta nilai error relatif yang dihitung berdasarkan selisih antara pembacaan sensor dan alat standar. Persamaan matematis (5) digunakan untuk mengevaluasi hasil kalibrasi.

$$Error = \frac{Nilai Acuan - Nilai Terukur}{Nilai Acuan} \times 100\% \quad (5)$$

TABEL 1. KALIBRASI SENSOR DENGAN ALAT PEMBANDING

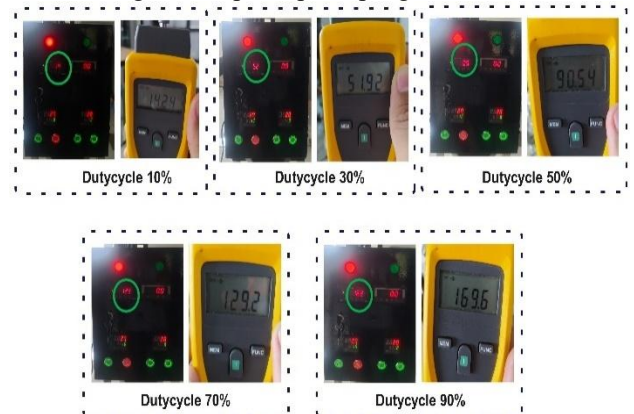
NO.	Duty Cycle (%)	Tacometer (RPM)	Pulse Meter (RPM)	Tegangan (V)	Error %
1.	10%	14,24	14	24	0,01
2.	20%	31,3	32	24	0,02
3.	30%	51,9	52	24	0,01
4.	40%	72	70	24	0,02
5.	50%	90,54	89	24	0,01
6.	60%	110,6	110	24	0,005
7.	70%	129,2	129	24	0,001
8.	80%	150	150	24	0
9.	90%	169,6	169	24	0,006
10.	100%	198	198	24	0
Rata-rata Error					0.0082

Dari hasil pengkalibrasian yang telah dilakukan, maka perhitungan nilai error yang didapatkan dengan nilai rata-rata error dari hasil kalibrasi sebesar 0.013%. Selanjutnya pengukuran dilakukan dengan melihat amplitude tegangan keluaran dari rangkaian driver yang telah dikalibrasi. Penentuan *duty cycle* pada pengkalibrasian didasarkan dari presentasi siklus on dan off pada control PWM.



Gambar 3. *Duty cycle* PWM

Pada gambar 3 terlihat hasil pengambilan data signal PWM dengan *duty cycle* yang telah ditentukan. Pengukuran menggunakan osciloskop dilakukan dengan 5 tingkatan *duty cycle* PWM mulai dari 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90%. Semakin besar siklus kerja dari driver motor pengaduk, maka semakin meningkat kecepatan putar pengadukan.



Gambar 4. Kalibrasi dengan pembandingan Tacometer.

Gambar 4 memperlihatkan hasil kalibrasi dengan menggunakan tachometer sebagai nilai terstandar. Kenaikan kecepatan terus meningkat berbanding lurus dengan peningkatan *duty cycle* yang diberikan pada rangkaian driver motor DC. Besaran amplitude keluaran dari driver motor dc yaitu 24 VDC.

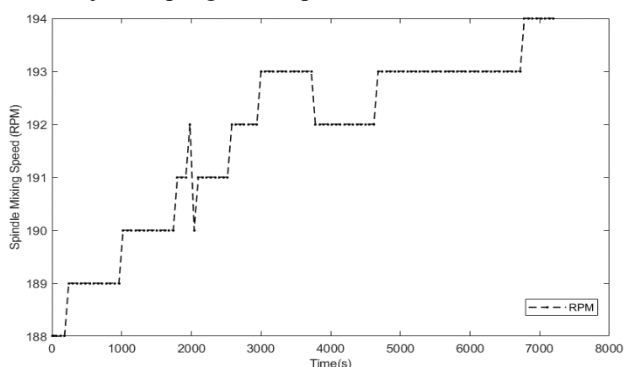
### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Pengujian Proses dengan Konsentrasi Asam bervariasi

Pengujian sistem dilakukan dalam dua skenario proses, masing-masing dengan konsentrasi asam sulfat sebesar 4% dan 5%, dengan takaran awal sebesar 1 Liter. Sedangkan untuk Nikel laterite ore pada kedua pengujian dengan takaran awal sebanyak 250 gr. Pemrosesan dilakukan selama 2,5 jam dengan suhu pemanasan pada tangung reactor sebesar 150°C.

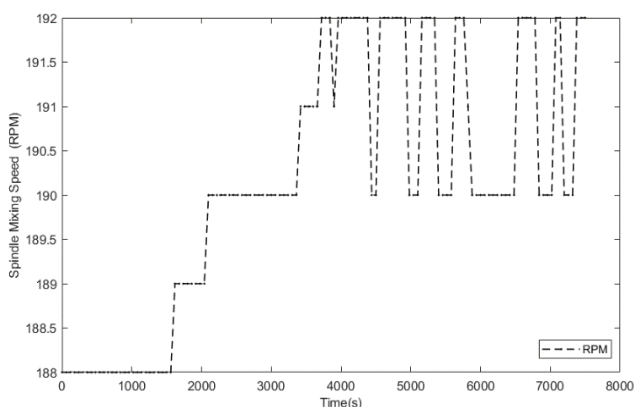
Dari kedua scenario tersebut, *dutycycle* PWM ditetapkan secara konstan sebesar 100% untuk menjamin suplai daya penuh ke motor selama proses pengadukan berlangsung. Sistem monitoring kecepatan putar motor menggunakan sensor tachometer optik yang terintegrasi dengan PLC ditampilkan secara real-time melalui lokal monitor pada panel kontrol.

Hasil monitoring menunjukkan bahwa kecepatan putar motor cenderung stabil selama proses berlangsung, dengan fluktuasi di bawah  $\pm 5\%$  dari kecepatan nominal. Pada kondisi 4% konsentrasi asam, kecepatan motor terjaga rata-rata di kisaran 192-193 rpm. Kecepatan pengadukan terus meningkat sejak awal pemrosesan dimulai. 30 menit awal pemrosesan dimulai kecepatan pengadukan cenderung lambat dikarenakan pada kondisi ini, Nikel laterite ore dan asam sulfat belum tercampur secara merata. Kecepatan pengadukan mulai menunjukkan kestabilan pengadukan pada 40 menit proses berlangsung. Pada gambar 6 Dapat dilihat grafik kerja dari pengadukan pada konsentrasi aman 4%.



Gambar 5. Grafik kecepatan pengadukan pada konsentrasi 4%.

Sementara itu, pada konsentrasi 5%, kecepatan berfluktuatif akan tetapi masih terjaga dengan rata-rata kecepatan pengadukan 190-194 rpm. Perubahan fluktuatif ini diduga berkaitan dengan meningkatnya viskositas larutan akibat tingginya konsentrasi asam, yang memberikan beban tambahan pada motor. Pada Gambar 6 dapat dilihat grafik kerja pengadukan selama proses berlangsung



Gambar 6. Grafik kecepatan pengadukan pada konsentrasi 5%.

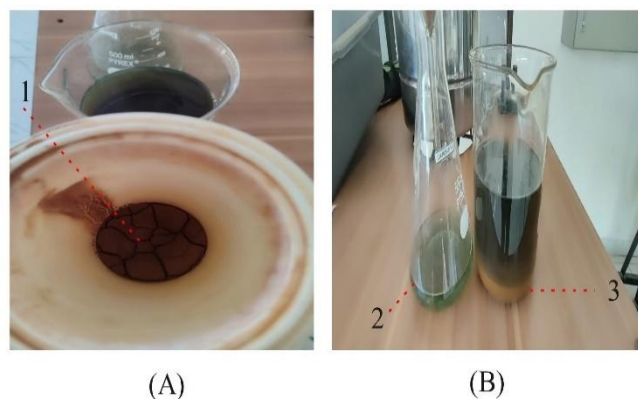
### B. Analisis Keandalan Pengadukan

Keandalan pengadukan dinilai dari kestabilan putaran motor selama durasi proses serta kemampuan sistem mempertahankan nilai PWM tetap pada 100% tanpa adanya penurunan daya keluaran. Berdasarkan data yang diperoleh,

sistem menunjukkan performa yang andal dalam menjaga kestabilan kecepatan motor. Tidak ditemukan indikasi *overcurrent* atau *overheat* pada motor, yang menunjukkan bahwa sistem kontrol PWM dengan *dutycycle* penuh bekerja optimal dalam mendukung pengadukan. Stabilitas kecepatan putar sangat penting dalam proses pengadukan ore karena berpengaruh langsung terhadap homogenitas pencampuran dan efisiensi pelarutan. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun beban berubah (akibat perubahan konsentrasi asam), sistem tetap mampu mempertahankan performa pengadukan yang konsisten.

### C. Evaluasi Kemampuan Pengadukan

Kemampuan pengadukan dinilai berdasarkan efisiensi pencampuran ore, yang diamati melalui homogenitas larutan pasca proses. Pada kedua skenario, diperoleh hasil bahwa ore tercampur secara merata meski terdapat endapan residu pada bagian bawah tabung reactor akan tetapi kepekatan warna larutan menunjukkan perubahan awal larutan setelah melalui proses pengadukan. Hal ini menunjukkan bahwa pada *dutycycle* 100%, sistem mampu menghasilkan torsi yang cukup untuk menjaga suspensi partikel ore dalam larutan, meskipun terjadi peningkatan viskositas pada konsentrasi asam yang lebih tinggi. Namun demikian, perlu dicatat bahwa pada konsentrasi asam 5%, waktu pencampuran optimal sedikit lebih lama dibandingkan kondisi 4%, yang mengindikasikan bahwa faktor fisikokimia larutan mulai mempengaruhi efisiensi pengadukan. Meskipun kecepatan motor masih berada dalam rentang stabil, beban kerja motor meningkat yang dapat berdampak terhadap konsumsi daya secara jangka panjang. Gambar 7 memperlihatkan hasil larutan setelah diproses beserta residu yang tertinggal pada bagian bawah tabung reactor.



Gambar 7. Hasil Proses Pengadukan . (A). Endapan Residu pada Tabung reactor, (B) Filtrat Hasil Pemrosesan.

### D. Implikasi dan Kajian Sistem

Temuan ini menunjukkan bahwa sistem kontrol berbasis PWM dengan *dutycycle* penuh mampu memberikan performa stabil dan andal untuk proses pencampuran berbasis motor listrik. Monitoring kecepatan putar motor memberikan data penting yang dapat digunakan sebagai parameter evaluasi performa pengadukan dan deteksi dini terhadap potensi penurunan efisiensi sistem. Hasil ini juga membuka peluang untuk pengembangan sistem kontrol tertutup (closed-loop), di mana kecepatan motor dapat disesuaikan secara otomatis berdasarkan karakteristik fluida proses, sehingga efisiensi energi dan durasi pencampuran dapat dioptimalkan.

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring kecepatan motor DC berbasis PWM dengan *duty cycle* konstan sebesar 100% untuk aplikasi pengadukan larutan asam dan nikel laterite ore dalam tabung reaktor. Pengujian dilakukan pada dua kondisi proses dengan konsentrasi asam masing-masing 4% dan 5%, untuk mengevaluasi kestabilan pengadukan dan kemampuan sistem dalam mencampur material secara homogen. Hasil monitoring menunjukkan bahwa kecepatan putar motor relatif stabil selama proses berlangsung, meskipun terdapat sedikit kenaikan dan penurunan selama proses berlangsung, kecepatan pada konsentrasi asam yang lebih tinggi akibat peningkatan viskositas. Hal ini menunjukkan bahwa sistem driver dan kontrol motor mampu bekerja pada kondisi beban variatif. Penggunaan topologi rangkaian driver H-Bridge berbasis MOSFET terbukti efektif dalam mendukung sistem pengadukan. Driver mampu memberikan daya penuh dengan respon cepat terhadap sinyal PWM, menjaga kestabilan suplai arus ke motor, serta melindungi sistem dari tegangan balik. Efisiensi dan keandalan rangkaian ini turut berperan penting dalam menjaga kestabilan kecepatan putar motor, yang berdampak langsung pada kualitas pencampuran ore. Dengan demikian, sistem driver motor DC yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi kebutuhan aplikasi industri berskala kecil yang memerlukan pengadukan viskositas sedang hingga tinggi secara kontinu dan konsisten. Hasil ini juga memberikan dasar untuk pengembangan lebih lanjut menuju sistem kontrol adaptif berbasis feedback untuk efisiensi energi yang lebih optimal.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan penelitian internal yang dilaksanakan di Politeknik Industri Logam Morowali dengan skema pengerjaan multi years. Dana penelitian diperoleh dari UPPM yang dibebankan pada DIPA Politeknik Industri Logam Morowali. Peneliti mengucapkan Terimakasih kepada semua pihak yang terlibat dalam penelitian tersebut

#### REFERENSI

- [1] Ahmad Abbasi Gharaei, Bahram Rezai, and Hadi Hamidian-Shormasti, "Environmental Friendly Approach: Atmospheric and High-Pressure Acid Leaching Studies, Low-Grade Laterites Nickel Processing," *Journal of Mining and Environment (JME)*, vol. 15, pp. 1591–1606, Jul. 2024.
- [2] Robbie G., McDonald, and Jian Li, "The High Temperature Co-Processing of Nickel Sulfide and Nickel Laterite Sources," *minerals*, Apr. 2020.
- [3] X. Zhihong Liu and Kuangdi, "Nickel Metallurgy," in *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*, K. Xu, Ed., Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 1–8. doi: 10.1007/978-981-19-0740-1\_840-1.
- [4] X. Xun Li and Kuangdi, "Metallurgy," in *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*, K. Xu, Ed., Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 1–11. doi: 10.1007/978-981-19-0740-1\_1381-1.
- [5] S. Kaya and Y.A. Topkaya, "High pressure acid leaching of a refractory lateritic nickel ore," *Miner Eng*, vol. 24, pp. 11888–1197, 2011.
- [6] M. R. Adam, A. Wisaksono, I. Sulistiyowati, and S. D. Ayuni, "Implementation of the Omron CPlE PLC on Continuous Automatic Plastic Shredding Machine Prototype," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 154–160, Jul. 2024, doi: 10.37905/jjee.v6i2.24644.
- [7] F. F. Kurniawan, P. Endramawan, and D. Hardiyanto, "Rancang Bangun Pengatur Kecepatan Motor DC Dengan PWM Berbasis Arduino Nano," *Jurnal Pendidikan Teknik Elektro (JUPITER)*, vol. 7, no. 2, 2022, [Online]. Available: <https://ejournal.unipma.ac.id/index.php/JUPITER/article/view/14028>
- [8] Munazzirah, "Rancang Bangun Reaktor Biogas dengan Pengaduk," 2016. [Online]. Available: <https://repositori.uin-alauddin.ac.id/9648/>
- [9] M. . Afandy, I. Hidayat, A. H. Mubarak, F. R. Rahman, and A. . Latifaf, "Pemodelan dan Analisa Kendali PI Static dan PI Adaptive DC-DC Boost Converter," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 131–136, Jul. 2022, doi: 10.37905/jjee.v4i2.13531.
- [10] R. S. Widagdo, B. Hariadi, and I. A. Wardah, "Simulation of Speed Control on a PMSM Using a PI Controller," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 63–69, Jan. 2024, doi: 10.37905/jjee.v6i1.22287.
- [11] Z. Jankovic and V.G. Papangelakis, "Measurement of pH in high-temperature nickel laterite pressure acid leach process solutions," *Hydrometallurgy*, vol. 105, pp. 155–160, Sep. 2010.
- [12] Fathan Bahfie, Azwar Manaf, Widi Astuti, Fajar Nurjaman, Erik Prastyo, and Ulin Herlina, "Development Of Laterite Ore Processing And Its Applications," *Indonesian Mining Journal Vo*, vol. 25, pp. 89–104, Oct. 2022.
- [13] Koen Binnemans and Peter Tom Jones, "The Twelve Principles of Circular Hydrometallurgy 1 2," *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 9, pp. 1–25, Dec. 2022.
- [14] SHAO Shuang, MA Bao-zhong, WANG Xin, ZHANG Wen-juan, CHEN Yong-qiang, and WANG Cheng-yan, "Nitric acid pressure leaching of limonitic laterite ores: Regeneration of HNO<sub>3</sub> and simultaneous synthesis of fibrous CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O by-products," *J Cent South Univ*, Aug. 2020.
- [15] A. W. Utama, R. I. Putri, and M. Rifa'i, "Kontrol Kecepatan Motor DC Menggunakan Metode PI Pada Proses Pengadukan Smart Biogas Berdasarkan Suhu Reaktor," *Jurnal Elektronika Otomasi Industri*, vol. 11, no. 3, 2021, [Online]. Available: <https://jurnal.polinema.ac.id/index.php/elkolind/article/view/4313>
- [16] M. Afandy, F. A. Samman, and A. E. U. Salam, "Performance Comparative study on DC-DC Boost Converters Non-Isolated Configurations," in *2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOLACT)*, 2019, pp. 728–732. doi: 10.1109/ICOLACT46704.2019.8938481.