# IMPLEMENTASI PENGENDALI PI BERBASIS STM32 PADA HARDWARE IN THE LOOP MOTOR INDUKSI

**Ihsan Auditia Akhinov[1)], Rizdam Firly Muzakki[1)]**

[1]Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta

E-mail: ihsan.auditia.akhinov@elektro.pnj.ac.id

***Abstract***

*This study implements a Proportional-Integral (PI) controller on an STM32F446RE for a hardware-in-the-loop (HIL) induction motor speed control system using V/f based sinusoidal pulse-width modulation (SPWM). The motor and inverter are modeled in MATLAB/Simulink, while the PI controller communicates with the plant through UART at a 50 ms sampling period. System performance is evaluated through communication latency, startup response, reference variations, and load disturbances. A 1000 packet communication test achieves an average round-trip latency of 4.714 ms and a maximum of 13.052 ms without packet loss. At a 1000 rpm reference, the system achieves a rise time of 0.9895 s, settling time of 3.5152 s, overshoot of 1.97%, and steady-state error of 0.34 rpm. The controller successfully tracks reference changes from 800 to 900 and 700 rpm and maintains the motor speed around 1000 rpm under load changes from 0 to 5 and 10 Nm. These results demonstrate the feasibility of implementing the PI controller on STM32 within a V/f-SPWM HIL system.*

***Keywords:*** *Induction Motor; Proportional-Integral Controller; Hardware-in-the-Loop; V/f-SPWM; STM32F446RE*

## PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan pada sistem penggerak industri karena memiliki konstruksi sederhana, kokoh, dan mudah dioperasikan. Pada aplikasi dengan kebutuhan perubahan kecepatan, kemampuan pengendali dalam mempertahankan kecepatan terhadap perubahan referensi dan gangguan beban menjadi aspek penting. Penggunaan inverter memungkinkan frekuensi dan tegangan motor diatur sesuai kebutuhan, sedangkan metode volts-per-hertz (V/f) banyak digunakan karena struktur kendalinya sederhana dan kebutuhan komputasinya relatif rendah. Namun, kinerja V/f konvensional dapat mengalami keterbatasan dinamika dan menimbulkan osilasi pada kondisi operasi tertentu, terutama ketika karakteristik motor dan beban berubah(Cosso et al. 2023). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa peningkatan kinerja V/f masih diperlukan untuk mengurangi speed droop dan mempertahankan kecepatan selama perubahan kondisi operasi (Dan et al. 2024; Son and Kim 2024).

Pengendali Proportional-Integral (PI) banyak digunakan pada sistem closed-loop V/f untuk mengolah error kecepatan dan menghasilkan sinyal kendali yang mempertahankan kecepatan motor terhadap perubahan kondisi operasi (Alathamneh et al. 2025; Borthakur and Kandali 2025). Penggunaan PI memungkinkan sistem mempertahankan kecepatan terhadap perubahan referensi dan gangguan tanpa menambah kompleksitas algoritma secara signifikan. Kinerja pengendalian dapat dievaluasi melalui parameter respons transien, seperti rise time, settling time, dan overshoot, serta kemampuan steady-state tracking (Borthakur and Kandali 2025).

Sebelum diterapkan pada sistem fisik, implementasi pengendali pada perangkat keras perlu mempertimbangkan waktu eksekusi, periode sampling, dan karakteristik implementasi real-time yang tidak sepenuhnya direpresentasikan dalam simulasi perangkat lunak (Fatemimoghadam, Varaha Iyer, and Kar 2024). Pendekatan Hardware in the Loop (HIL) memungkinkan algoritma pengendali dijalankan pada perangkat keras dan berinteraksi dengan model plant secara langsung sehingga pengujian implementasi dapat dilakukan tanpa menggunakan keseluruhan perangkat fisik (Krim and Mimouni 2023; Mohammadi and Bok 2024; Uralde et al. 2023).

Pada implementasi HIL yang menggunakan komunikasi serial antara mikrokontroler dan komputer, latency dan periodisitas pertukaran data menjadi faktor penting karena dapat memengaruhi sinkronisasi antara controller dan model plant. Oleh karena itu, evaluasi sistem HIL tidak hanya perlu memperhatikan kemampuan controller menghasilkan sinyal kendali, tetapi juga karakteristik waktu komunikasi antara perangkat keras dan model plant. Pengukuran round-trip latency dapat digunakan untuk mengetahui waktu yang diperlukan dalam proses pertukaran data antara kedua sisi sistem.

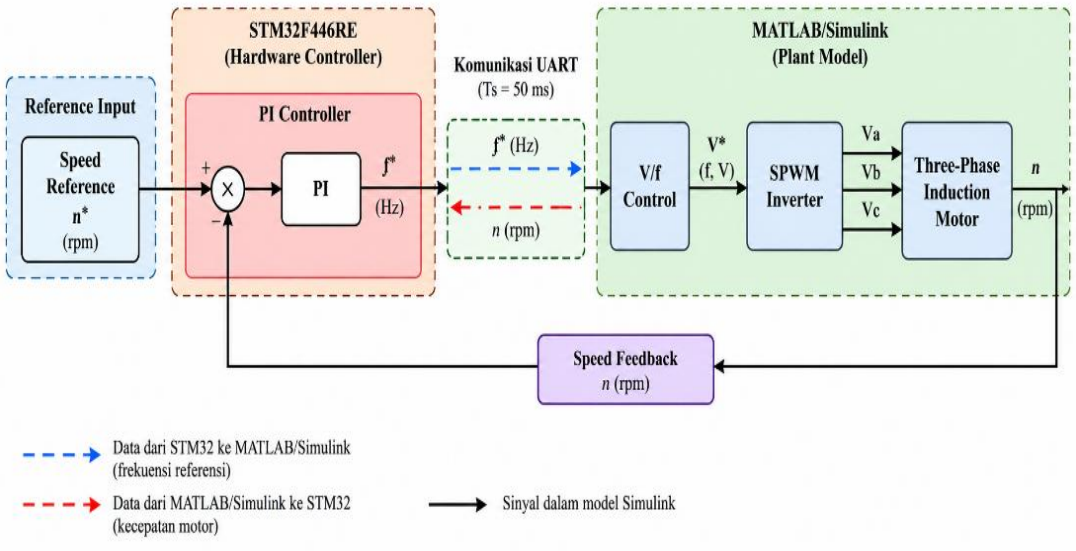
Penelitian sebelumnya telah menunjukkan penerapan Hardware in the Loop untuk validasi pengendalian motor listrik, termasuk implementasi pengendali pada perangkat keras dan interaksi dengan model plant secara real time (Khadar et al. 2023; Mohammadi and Bok 2024; Uralde et al. 2023)). Namun, penelitian tersebut menggunakan konfigurasi sistem, metode pengendalian, dan objek validasi yang berbeda. Pada penelitian ini, fokus diberikan pada integrasi pengendali PI yang dijalankan secara langsung pada STM32F446RE dengan model motor induksi tiga fasa berbasis V/f-SPWM pada MATLAB/Simulink melalui komunikasi UART. Selain

mengevaluasi respons kecepatan terhadap perubahan referensi dan gangguan beban, penelitian ini juga mengukur round-trip latency komunikasi dan membandingkannya dengan periode sampling HIL sebesar 50 ms. Dengan demikian, evaluasi yang dilakukan mencakup aspek komunikasi, implementasi pengendali pada perangkat keras, dan respons closed-loop motor induksi dalam satu konfigurasi HIL.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengimplementasikan pengendali PI berbasis STM32F446RE pada sistem HIL untuk pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan V/f dan SPWM. Model motor dan inverter dibangun pada MATLAB/Simulink, sedangkan algoritma PI dijalankan pada STM32 dan berkomunikasi dengan model melalui UART. Kinerja sistem dievaluasi melalui pengukuran round-trip latency, respons startup pada referensi 1000 rpm, perubahan referensi 800–900–700 rpm, serta gangguan beban 0–5–10 Nm. Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi karakteristik komunikasi HIL dan kinerja pengendali PI dalam mengikuti referensi serta mempertahankan kecepatan motor terhadap perubahan beban.

## METODE PENELITIAN

### 2.1 Arsitektur Sistem HIL




Gambar 1. Blok Diagram Sistem Hardware-in-the-Loop Pengendalian Kecepatan Motor Induksi

Gambar 1 menunjukkan blok diagram sistem Hardware-in-the-Loop (HIL) yang digunakan untuk implementasi pengendalian kecepatan motor induksi. Sistem terdiri atas STM32F446RE sebagai hardware controller dan MATLAB/Simulink sebagai plant

model. Kecepatan referensi $\omega_{ref}$ diberikan sebagai masukan pada pengendali PI yang diimplementasikan pada STM32F446RE. Pengendali PI mengolah selisih antara kecepatan referensi dan kecepatan umpan balik $\omega$ untuk menghasilkan frekuensi referensi control $f_{cont}$ dalam satuan Hz.

Frekuensi control $f_{cont}$ dikirim dari STM32F446RE ke Simulink melalui komunikasi UART dengan waktu sampling $T_s$ =50 ms. Pada Simulink, frekuensi referensi tersebut digunakan sebagai masukan pada blok pengendalian V/f untuk menentukan besarnya tegangan dan frekuensi sumber. Sinyal tersebut selanjutnya digunakan oleh blok SPWM untuk membangkitkan sinyal tegangan tiga fasa $V_a, V_b, dan\, V_c$ yang menggerakkan model motor induksi tiga fasa (Son and Kim 2024).

Kecepatan motor $\omega$ yang diperoleh dari model motor kemudian dikirim kembali ke STM32F446RE melalui UART sebagai sinyal umpan balik pengendali. Dengan konfigurasi tersebut, proses perhitungan pengendali PI dilakukan pada perangkat keras STM32, sedangkan dinamika motor induksi, inverter, dan pembangkitan sinyal V/f-SPWM direpresentasikan dalam lingkungan Simulink. Arsitektur ini memungkinkan pengujian algoritma pengendalian pada perangkat keras secara terintegrasi dengan model plant tanpa menggunakan motor induksi secara fisik. Pendekatan HIL juga telah digunakan untuk memvalidasi algoritma pengendalian motor induksi melalui interaksi antara perangkat pengendali dan model motor secara real time(Khadar et al. 2023).

## 2.2 Parameter sistem

Tabel 1
Parameter Sistem

| Parameter | Nilai |
|---|---|
| Jenis motor | Motor induksi tiga fasa |
| Daya nominal | 5 HP |
| Tegangan nominal | 460 V |
| Frekuensi nominal | 60 Hz |
| Kecepatan nominal | 1750 rpm |
| Tegangan DC-link | 460 V |
| Frekuensi carrier SPWM | 10 kHz |
| Mikrokontroler | STM32F446RE |
| Komunikasi | UART |
| Baud rate | 460800 bps |
| Kp | 0,3 |
| Ki | 2,0 |

Parameter sistem yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 1. Model plant menggunakan motor induksi tiga fasa dengan daya nominal 5 HP, tegangan 460 V, frekuensi nominal 60 Hz, dan kecepatan nominal 1750 rpm. Model motor terhubung dengan sumber DC-link sebesar 460 V dan inverter SPWM dengan frekuensi carrier 10 kHz. Pada sisi pengendali, algoritma PI diimplementasikan pada mikrokontroler STM32F446RE dengan parameter Kp=0,3 dan Ki=2,0. Pertukaran data antara STM32F446RE dan MATLAB/Simulink dilakukan menggunakan komunikasi UART pada baud rate 460800 bps dengan waktu sampling HIL sebesar 50 ms. Konfigurasi tersebut digunakan sebagai dasar pelaksanaan pengujian komunikasi dan pengendalian kecepatan motor induksi.

## 2.3 Algoritma pengendali PI

Pengendali PI diimplementasikan secara diskrit pada mikrokontroler STM32F446RE dengan waktu sampling $T_s$=50 ms. Sinyal error diperoleh dari selisih antara kecepatan referensi dan kecepatan motor sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (1). Untuk

menjaga skala masukan pengendali, error kecepatan dinormalisasi terhadap kecepatan nominal motor sebesar 1750 rpm seperti ditunjukkan pada Persamaan (2).

Selanjutnya, komponen integral dihitung secara rekursif menggunakan metode integrasi diskrit, sedangkan keluaran pengendali diperoleh dari penjumlahan komponen proporsional dan integral. Persamaan pengendali tersebut ditunjukkan pada Persamaan (3) dan (4). Parameter pengendali yang digunakan adalah $K_p$ =0,3 dan $K_i$ =2,0. Nilai $K_p$ =0,3 dan $K_i$ =2,0 diperoleh melalui proses tuning secara iteratif pada model MATLAB/Simulink. Beberapa kombinasi parameter PI diuji dengan mempertimbangkan respons transien, kemampuan tracking terhadap perubahan referensi, overshoot, dan steady-state error. Kombinasi $K_p$ =0,3 dan $K_i$ =2,0 dipilih karena memberikan karakteristik respons yang paling sesuai dengan kebutuhan sistem, yang selanjutnya digunakan pada implementasi pengendali PI berbasis STM32F446RE. Keluaran pengendali kemudian dikonversikan menjadi frekuensi referensi dengan frekuensi dasar 50 Hz. Untuk menjaga keluaran tetap berada pada daerah operasi inverter, frekuensi referensi dibatasi pada rentang 0–50 Hz. Mekanisme anti-windup diterapkan pada bagian integral untuk mencegah akumulasi integral ketika keluaran pengendali mengalami saturasi(Alathamneh et al. 2025; Borthakur and Kandali 2025; Dan et al. 2024).

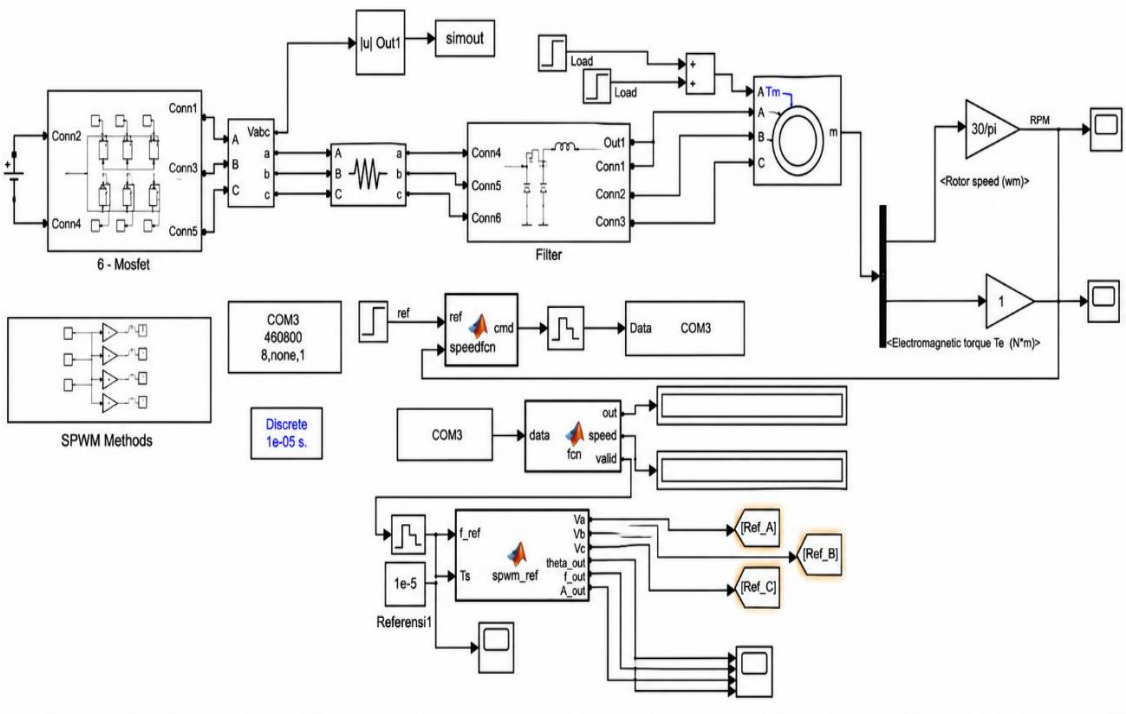
$$e(k) = \omega_{ref} - \omega \tag{1}$$

$$e_{pu}(k) = \frac{e(k)}{1750} \tag{2}$$

$$I(k) = I(k-1) + K_i T_s e_{pu}(k) \tag{3}$$

$$u_{pu}(k) = K_p e_{pu}(k) + I(k) \tag{4}$$

## 2.4 Implementasi V/f-SPWM dan Komunikasi UART




Gambar 2. Implementasi Model V/f-SPWM dan Komunikasi UART pada MATLAB/Simulink

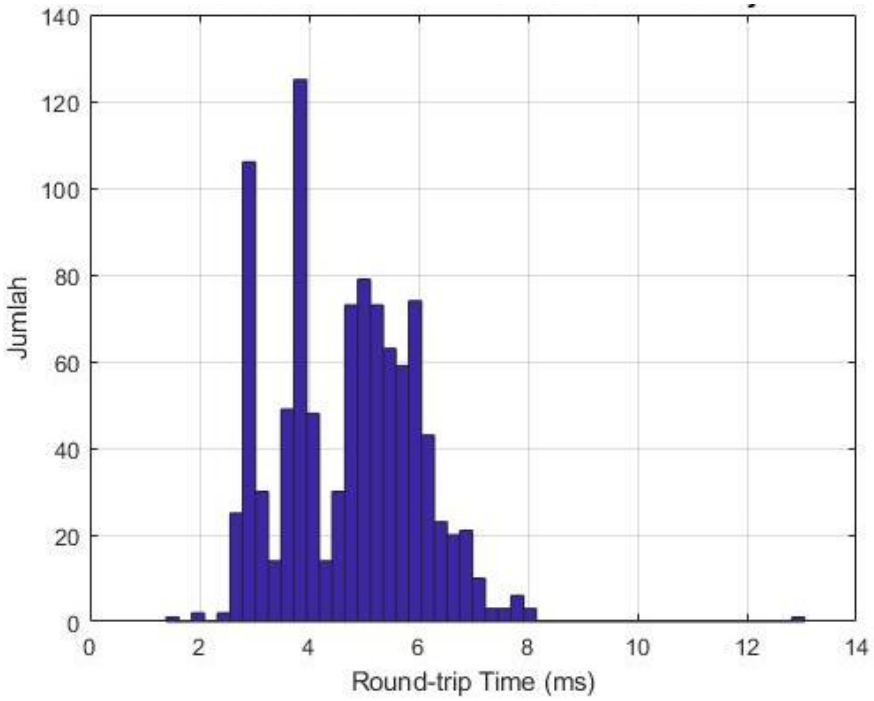
Implementasi model plant dan antarmuka komunikasi HIL direalisasikan pada MATLAB/Simulink seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Model terdiri atas sumber DC-link, inverter tiga fasa, rangkaian filter, model motor induksi tiga fasa, pembangkitan SPWM, serta blok komunikasi UART dengan STM32F446RE. Frekuensi control $f_{cont}$ yang dihasilkan oleh pengendali PI pada STM32 diterima oleh MATLAB/Simulink dan digunakan sebagai masukan pada blok perhitungan modulation index berbasis V/f. Nilai modulation index tersebut selanjutnya digunakan untuk membangkitkan sinyal SPWM yang mengendalikan inverter tiga fasa.

Inverter menghasilkan tegangan tiga fasa yang diberikan kepada model motor induksi melalui rangkaian filter. Kecepatan rotor yang dihasilkan oleh model motor dikonversi ke satuan rpm dan digunakan sebagai sinyal umpan balik. Nilai kecepatan motor bersama frekuensi referensi dikirimkan kembali ke STM32F446RE melalui blok UART Send untuk digunakan pada perhitungan pengendali PI pada siklus berikutnya. Model

juga dilengkapi dengan masukan gangguan torsi beban untuk mengevaluasi kemampuan pengendali dalam mempertahankan kecepatan ketika terjadi perubahan beban.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Hasil Pengujian Latency Komunikasi UART

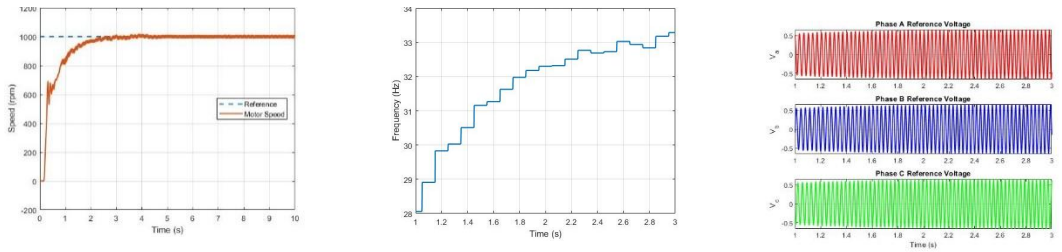



Gambar 3. Distribusi Round-Trip Latency Komunikasi UART antara MATLAB/Simulink dan STM32F446RE

Gambar 3 menunjukkan distribusi round-trip latency komunikasi UART antara Simulink dan STM32F446RE berdasarkan 1000 kali pengiriman paket. Sebagian besar latency berada pada kisaran 3–7 ms, dengan nilai rata-rata 4,714 ms, median 4,875 ms, simpangan baku 1,264 ms, serta nilai minimum dan maksimum masing-masing 1,393 ms dan 13,052 ms. Seluruh paket berhasil diterima tanpa kehilangan data. Nilai latency maksimum tersebut hanya mencapai 26,1% dari periode HIL 50 ms, sehingga waktu pertukaran data masih berada dalam satu periode pengendalian. Hasil ini menunjukkan bahwa komunikasi UART mampu mendukung implementasi HIL dengan periode pembaruan 50 ms.

### 3.2 Respons Kecepatan pada Kondisi Startup

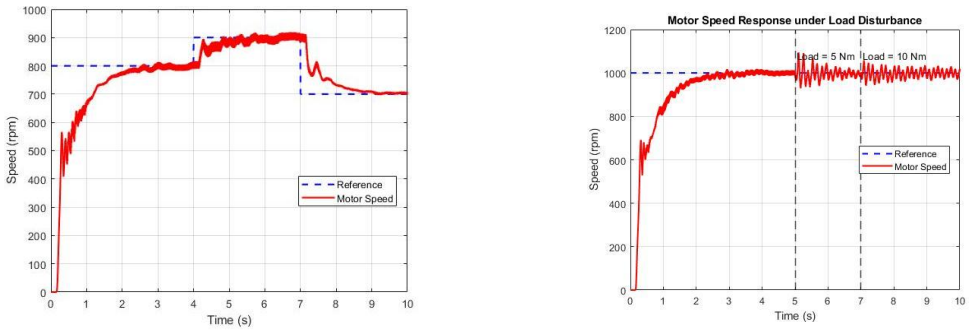
Gambar 4 memperlihatkan respons sistem pada kondisi startup dengan referensi kecepatan 1000 rpm. Gambar 4(a) menunjukkan bahwa kecepatan motor meningkat dari kondisi awal menuju referensi dan mencapai kondisi tunak dengan rise time 0,9895 s, settling time 3,5152 s, overshoot 1,97%, dan steady-state error 0,34 rpm. Peningkatan kecepatan tersebut diikuti oleh kenaikan frekuensi referensi hingga sekitar 33,3 Hz seperti ditunjukkan pada Gambar 4(b). Selanjutnya, Gambar 4(c) menunjukkan tiga tegangan referensi sinusoidal $V_a, V_b, dan\, V_c$ dengan pergeseran fasa 120° yang digunakan dalam pembangkitan SPWM. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengendali PI pada STM32 mampu menghasilkan sinyal kendali yang mengarahkan model motor menuju referensi kecepatan secara stabil.




(a) (b) (c)

Gambar 4. Respons sistem pada kondisi startup: (a) kecepatan motor, (b) frekuensi referensi, dan (c) tegangan referensi tiga fasa.

### 3.3 Respons terhadap Perubahan




(a) (b)

Gambar 5. Respons kecepatan terhadap perubahan kondisi operasi: (a) perubahan referensi kecepatan dan (b) gangguan beban.

Gambar 5(a) menunjukkan respons kecepatan motor terhadap perubahan referensi dari 800 rpm menjadi 900 rpm pada t=4 s dan kemudian menjadi 700 rpm pada t=7 s.

Berdasarkan Tabel 1, perubahan referensi 800–900 rpm menghasilkan kecepatan maksimum sekitar 925 rpm terhadap referensi 900 rpm, dengan maximum speed deviation sekitar 25 rpm. Pada perubahan referensi 900–700 rpm, kecepatan motor mencapai nilai maksimum sekitar 800 rpm sebelum bergerak menuju referensi 700 rpm, sehingga maximum speed deviation mencapai sekitar 100 rpm. Setelah periode transien, kecepatan motor bergerak menuju nilai referensi yang diberikan.

Gambar 5(b) menunjukkan respons kecepatan motor pada referensi tetap 1000 rpm terhadap perubahan torsi beban. Beban dinaikkan dari 0 Nm menjadi 5 Nm pada t=5 s dan kemudian menjadi 10 Nm pada t=7s. Berdasarkan Tabel 1, perubahan beban 0–5 Nm menghasilkan kecepatan minimum sekitar 932 rpm dan maksimum sekitar 1094 rpm, dengan maximum speed deviation sekitar 94 rpm terhadap referensi 1000 rpm. Selanjutnya, perubahan beban 5–10 Nm menghasilkan kecepatan minimum sekitar 945 rpm dan maksimum sekitar 1060 rpm, dengan maximum speed deviation sekitar 60 rpm. Meskipun perubahan beban menyebabkan peningkatan osilasi kecepatan, respons motor tetap berosilasi di sekitar referensi 1000 rpm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengendali PI berbasis STM32 dapat mengikuti perubahan referensi dan mempertahankan regulasi kecepatan ketika terjadi perubahan torsi beban.

Tabel 1
Pengungkapan Tanggungjawab Sosial Perusahaan

| Jenis pengujian | Perubahan kondisi | Waktu (s) | Referensi (rpm) | Kec. min (rpm) | Kec. Max (rpm) | Maximum speed deviation (rpm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Perubahan referensi | 800 → 900 rpm | 4 | 900 | 800 | 925 | 25 |
| Perubahan referensi | 900 → 700 rpm | 7 | 700 | 700 | 800 | 100 |
| Gangguan beban | 0 → 5 Nm | 5 | 1000 | 932 | 1094 | 94 |
| Gangguan beban | 5 → 10 Nm | 7 | 1000 | 945 | 1060 | 60 |

## SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan pengendali PI berbasis STM32F446RE pada sistem Hardware in the Loop (HIL) untuk pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa berbasis V/f-SPWM. Integrasi antara STM32 dan Simulink melalui komunikasi UART dapat berjalan dengan baik, dengan rata-rata round-trip latency sebesar 4,714 ms dan nilai maksimum 13,052 ms. Nilai tersebut masih berada di bawah periode pembaruan HIL sebesar 50 ms sehingga komunikasi dapat mendukung proses pengendalian yang diterapkan.

Pada pengujian startup dengan referensi 1000 rpm, pengendali menghasilkan rise time sebesar 0,9895 s, settling time 3,5152 s, overshoot 1,97%, dan steady-state error sebesar 0,34 rpm. Pengujian perubahan referensi 800–900–700 rpm menunjukkan bahwa motor mampu mengikuti perubahan kecepatan, sedangkan pengujian gangguan beban 0–5–10 Nm menunjukkan bahwa kecepatan tetap berada di sekitar referensi 1000 rpm meskipun terjadi peningkatan osilasi akibat perubahan beban. Hasil tersebut menunjukkan bahwa implementasi PI pada STM32F446RE mampu menjalankan pengendalian kecepatan secara terintegrasi dengan model V/f-SPWM pada MATLAB/Simulink melalui pendekatan HIL.

## DAFTAR PUSTAKA

Alathamneh, Mohammad, Haneen Ghanayem, R M Nelms, and Ibrahim M Allafi. 2025. "Open-Circuit Fault Mitigation for Inverter-Driven Induction Motor Based on Closed-Loop Volt-per-Hertz." *Energies* 18(7). https://www.mdpi.com/1996-1073/18/7/1596.

Borthakur, Rishavi, and Dr Kandali. 2025. "Design and Simulation of a Three-Phase Induction Motor for Speed Control Using Constant V/f Technique with Sinusoidal PWM-Based Inverter." *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* 14: 12–20.

Cosso, Simone et al. 2023. "Stability Issues in V/f Controlled Medium Voltage Induction Motor Drives Considering Magnetizing Inductance Variation." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 38(4): 2909–18.

Dan, Hanbing et al. 2024. "Implementation and Stability Analysis of an Improved V/f

Induction Motor Control Scheme Based on Constant Rotor Flux." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 39(3): 1840–50.

Fatemimoghadam, Armita, Lakshmi Varaha Iyer, and Narayan C Kar. 2024. "Real-Time Validation of Enhanced Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Using Dense-Neural-Network-Based Control." *IEEE Access* 12: 73323–39.

Khadar, Saad, Almoataz Y Abdelaziz, Zakaria M Salem Elbarbary, and Mahmoud A Mossa. 2023. "An Improved Sensorless Nonlinear Control Based on SC-MRAS Estimator of Open-End Winding Five-Phase Induction Motor Fed by Dual NPC Inverter: Hardware-in-the-Loop Implementation." *Machines* 11(4). https://www.mdpi.com/2075-1702/11/4/469.

Krim, Saber, and Mohamed Faouzi Mimouni. 2023. "Design of Improved Direct Torque Control Based on a Five Level Torque Controller and a New Sugeno-Takagi Fuzzy Super-Twisting Controller Applied to an Induction Machine." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 126: 106900. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197623010849.

Mohammadi, Fazel, and Rasoul Bok. 2024. "Real-Time Controller-Hardware-in-the-Loop Testing of DC Motor-Drive Systems." *Advances in Electrical and Electronic Engineering* 22(1): 54–61.

Son, Dong-Hyeok, and Sung-An Kim. 2024. "Simplified V/f Control Algorithm for Reduction of Current Fluctuations in Variable-Speed Operation of Induction Motors." *Energies* 17(7). https://www.mdpi.com/1996-1073/17/7/1699.

Uralde, Jokin et al. 2023. "Model Predictive Control Design and Hardware in the Loop Validation for an Electric Vehicle Powertrain Based on Induction Motors." *Electronics* 12(21). https://www.mdpi.com/2079-9292/12/21/4516.