

Kendali Kecepatan *Switched Reluctance Motor* Berbasis *FPGA*

Arifin Wibisono
Program Studi teknik Elektro,
Fakultas teknik
Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan
Dhuwur Semarang, Indonesia
arifin@unika.ac.id

Slamet Riyadi
Program Studi teknik Elektro,
Fakultas teknik
Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan
Dhuwur Semarang, Indonesia,
riyadi@unika.ac.id

Sulaiman
Program Studi teknik Elektro,
Fakultas teknik
Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan
Dhuwur Semarang, Indonesia
17f10009@student.unika.ac.id

Abstract - Renewable drive technology is developing in the current era, one of which is electric transportation. The Switched Reluctance Motor (SRM) was chosen for the transportation development because it has many advantages, including not using permanent magnets and simple construction in the form of an iron core in the rotor and stator windings. SRM works based on the reluctance phenomenon, namely, if the stator is energized, the stator will attract the nearby rotor, this is based on the tendency of the rotor poles to align with the stator excitation poles. SRM requires high speed switching control to operate and requires correct rotor position to operate. Maximum switching and good accuracy can use Field-Programmable Gate Array (FPGA) and rotary encoder as input for rotor position information. To use SRM in electric transport, it is necessary to adjust the speed with ease and precision. With the Pulse Width Modulation (PWM) technique, the size of the excitation depends on the size of the current, the size of the current is determined by the input voltage to the SRM. In this control, the PWM width can be changed by setting the carrier set and modulation set in the FPGA program. In this study, it is proposed to control the SRM speed by adjusting the PWM of the rotary encoder to produce the desired RPM. To support the achievement of this research, hardware testing was carried out in the laboratory.

Keywords - Duty cycle, FPGA, PWM, Reluctance, Switched Reluctance Motor.



Creative Commons Attribution-
NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
License.

I. PENDAHULUAN

Switched Reluctance Motor (SRM) menjadi kandidat kuat untuk transportasi elektrik karena strukturnya yang sederhana, kokoh, biaya rendah, kemampuan toleransi kesalahan kecil, dan keandalan tinggi. Aplikasi untuk kendaraan listrik *hybrid (HEVs)* atau kendaraan listrik (*EVs*) membutuhkan kemampuan pengembangan torca tinggi [1][2]. Untuk mengatur kecepatan pada motor bisa menggunakan mikrokontroler untuk pengaturan lebar pulsanya, akan tetapi *Field Programmable Gate Array (FPGA)* dipilih untuk pengoperasian *SRM* karena memiliki kecepatan kerja yang tinggi dibanding mikrokontroler. *FPGA* digunakan sebagai kendali utama *SRM* karena dapat diprogram/dikonfigurasi di lapangan, untuk melakukan perancangan program menggunakan aplikasi

berbahasa *VHDL (VHSIC Hardware Description Language)*. Dengan metode *digital pulse with modulation*, besar kecilnya torca dipengaruhi oleh arus, besar kecilnya arus didapatkan dari masukan tegangan. Metode tersebut menggabungkan blok khusus berfrekuensi tinggi yang terdapat pada *FPGA* seperti *delay locked-loop* yang dapat mengkalikan frekuensi *clock*[3]. Pengoperasian *SRM* menggunakan konverter asimetris tiga fasa untuk melakukan proses eksitasi dan dibantu dengan *rotary encoder* sebagai pembaca posisi rotornya. Motor ini beroperasi karena fenomena reluktansi dimana saat rotor dan stator berada pada posisi sejajar maka belitan stator mengalami reluktansi minimum dan induktansi maksimum. Sementara itu, induktansi minimum dicapai ketika mereka berada dalam posisi tidak sejajar. Teknik modulasi yang mengubah lebar pulsa dengan frekuensi dan amplitudo tetap untuk mengontrol sirkuit *analog* dengan *output digital* mikroprosesor dikenal sebagai *Pulse Width Modulation (PWM)*. Untuk mengaturnya yaitu dengan mengubah sinyal modulasi pada sinyal *carrier*, makin besar nilai sinyal modulasi maka sinyal *PWM* makin lebar dan sebaliknya. Dengan mengatur *PWM* pada pensaklaran tiap fasa *SRM* kecepatan motor dapat berubah sesuai *duty cycle* yang diberikan.

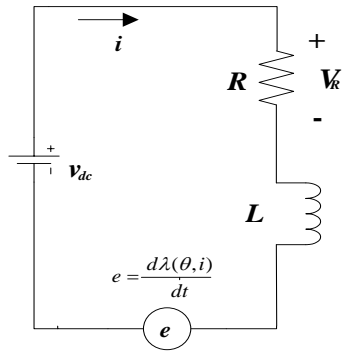
Dalam penelitian ini penulis bermaksud untuk mengatur kecepatan putaran motor dengan kendali *PWM* pensaklaran tiap fasa untuk menghasilkan RPM yang sesuai pengaturan *duty cycle* yang diberikan. Dengan metode pengaturan *PWM* tiap fasa, perubahan speed motor elektrik *SRM* dapat diketahui dengan melihat hasil kecepatan pada *tachometer* dan keluaran *PWM* tiap fasa *SRM* di osiloskop. Untuk memvalidasi penelitian ini maka dilakukan pengujian *hardware* secara langsung di laboratorium.

II. METODOLOGI PENELITIAN

SRM merupakan motor listrik yang mempunyai konstruksi sederhana pada bagian rotor yaitu berupa inti besi dan stator berupa belitan[4]. Pada bagian rotor yang tidak terdapat magnet dan belitan membuat motor ini dapat berputar dengan kecepatan tinggi[5][6]. *SRM* memiliki torca awal yang tinggi sehingga memiliki efisiensi yang tinggi dibandingkan

motor listrik lainnya. Motor ini beroperasi karena fenomena reluktansi. Ketika stator dan rotor berada pada posisi sejajar (*aligned*), belitan stator memiliki induktansi maksimum dan reluktansi minimum. Sementara itu, induktansi minimum dicapai ketika mereka berada dalam posisi tidak sejajar (*unaligned*)[7][8].

Rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan pada Gambar 1 yang terdiri dari hambatan atau resistansi (R), induktansi (L), dan *Electromotive force* (EMF). Pada saat motor berputar, belitan stator *SRM* menghasilkan *back-EMF* atau memiliki polaritas tegangan yang berbanding terbalik dengan sumber[9].



Gambar 1. Rangkaian ekuivalen *SRM*

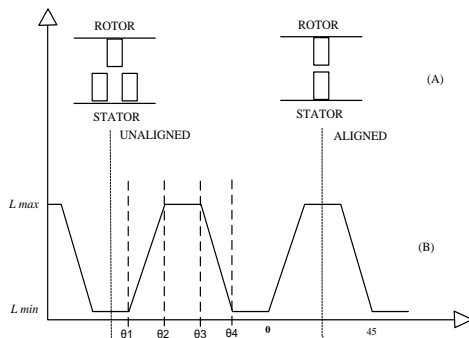
Dari rangkaian Gambar 1 ekuivalen di atas, maka didapatkan persamaan tegangan pada *SRM* sebagai berikut:

$$V_{dc} = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

$$V \cdot d = i \cdot R + L \frac{di}{dt} + \omega \cdot i \frac{dL}{d\theta} \quad (2)$$

di mana V sebagai tegangan, i arus fasa, R hambatan, L induktansi, θ posisi rotor, dan ω kecepatan motor. Dengan menambahkan d sebagai *duty cycle* pada ekuivalen motor maka besaran tegangan sebenarnya pada *SRM* berbasis *PWM* dapat diketahui.

SRM yang digunakan menggunakan konstruksi dua belas stator dan delapan rotor, setiap belitan statornya menghasilkan karakteristik induktansi terkait dengan posisi rotornya.



Gambar 2. (a) posisi rotor terhadap stator (b) profil induktansi

Gambar 2 menunjukkan bahwa *SRM* beroperasi pada saat meningkatnya induktansi, hal ini didasari pada posisi rotor yang tidak sejajar (*unaligned*) dengan stator di posisi sejajar (*aligned*). *SRM* memiliki hasil empat profil induktansi pada setiap putarannya karena diwakili dengan mekanik 360° serta ada delapan rotor pada konstruksi motor, sehingga menghasilkan mekanik 45° disetiap induktansinya. Pada Gambar 2 menunjukan interval yang berbeda-beda, $0 \leq \theta \leq \theta_1$ dan $\theta_4 \leq \theta \leq \theta_5$ yaitu interval pertama yang kutub rotor dan stator berada di posisi *unaligned*, pada kondisi ini memiliki induktansinya kecil karena torsi rendah. Tumpang tindih posisi kutub rotor dimulai pada interval kedua $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ karena kutub rotor mulai *overlap* dan nilai induktansi maksimum. Interval ketiga $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_3$ kutub rotor dan statornya dalam posisi *aligned*, maka nilai induktansi menjadi maksimum. Pada interval keempat $\theta_3 \leq \theta \leq \theta_4$ kutub rotor mulai berjauhan dengan stator. Setiap sudutnya dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{2\pi}{Pr} - \beta s + \beta r \right] \quad (3)$$

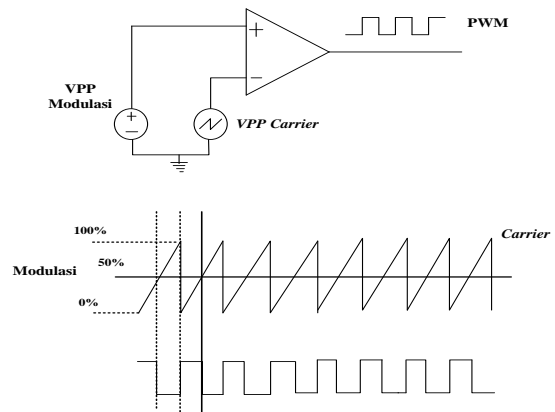
$$\theta_2 = \theta_1 + \beta s \quad (4)$$

$$\theta_3 = \theta_2 + (\beta r - \beta s) \quad (5)$$

$$\theta_4 = \theta_3 + \beta s \quad (6)$$

di mana θ sudut rotor, βr sudut lengkungan rotor, βs sudut lengkungan stator, dan Pr jumlah kutub rotor.

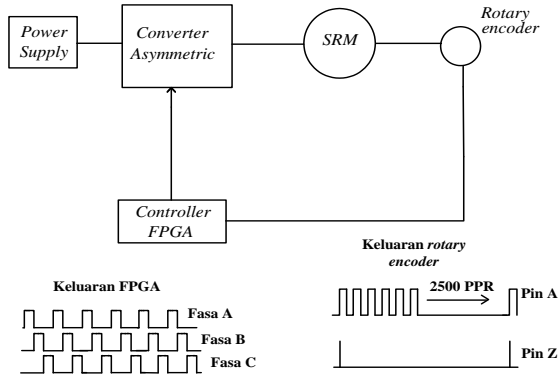
Pulse Width Modulation (*PWM*) yaitu suatu cara untuk mengatur lebar sempit suatu pulsa penyalan pada setiap fasa *SRM*[10]. Salah satu cara untuk mengaturnya yaitu dengan mengatur sinyal modulasi pada sinyal *carrier*, makin besar nilai sinyal modulasi maka sinyal *PWM* makin lebar dan kecepatan motor akan berputar kencang, dan begitu juga sebaliknya[11][12].



Gambar 3. Pengaturan *PWM*

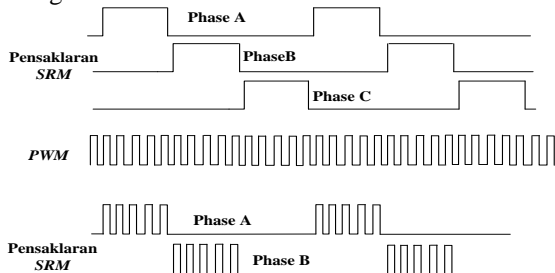
Kendali Kecepatan *Switched Reluctance Motor* Berbasis *FPGA*

Sinyal pulsa untuk penentuan posisi rotor yang dihasilkan *rotary encoder* akan dikirimkan ke kendali utama *FPGA* dan di program dengan mengatur lebar sinyal menggunakan pengaturian *duty cycle*. Jika *VPP* modulasi lebih lebar dari *VPP* carrier maka kondisi saklar penyalaaan *SRM* akan hidup, dan begitu pula sebaliknya.



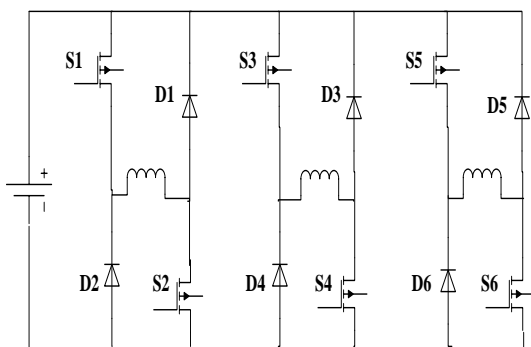
Gambar 4. Diagram blok *hardware SRM*

Pada saat *PWM* pensaklaran berjalan T_{on} fasa A,B dan C didalamnya terdapat *PWM* pengatur kecepatan, sehingga waktu penyalaaan akan diatur dengan sinyal *duty cycle*. Berikut bentuk sinyal penyalaaan *SRM* yang sudah diatur *PWM* ditampilkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 5. Pensaklaran *SRM* dengan pengaturan *PWM*

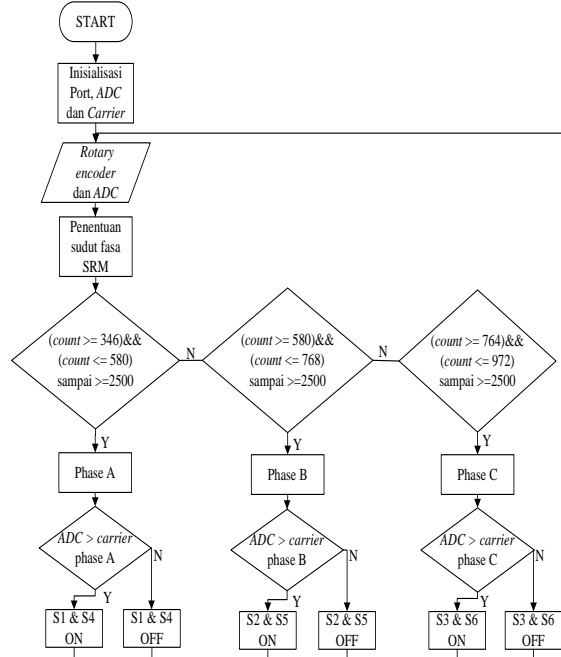
Pada Gambar 5 keluaran *PWM* dengan pengaturan *duty cycle* 50%, menghasilkan lebar T_{on} yang sebanding dengan lebar T_{off} . Hasil dari perubahan lebar pulsa nantinya akan digunakan untuk sinyal penyalaaan pada *switching* driver asimetris.



Gambar 6. Driver Asimetris

Untuk menjalankan *SRM* terdapat dua mode, *magnetizing* adalah mode pertama yang pemberian eksitasinya untuk menyalakan saklar S_1 dan S_2 di belitan fasa-A. *Demagnetizing* menjadi mode kedua dengan mematikan saklar S_1 dan S_2 arus yang tersimpan pada belitan stator akan mengalir melalui D_2 dan D_1 ke sumbernya. Pada kondisi tersebut tegangan di belitan fasa-A sama dengan masukan V_{dc} yang menghasilkan torsi positif jika diberikan pada saat induktansi fasa-A bertambah[13][14][15].

Berikut *flowchart* sistem kendali kecepatan *SRM* berbasis *FPGA*.

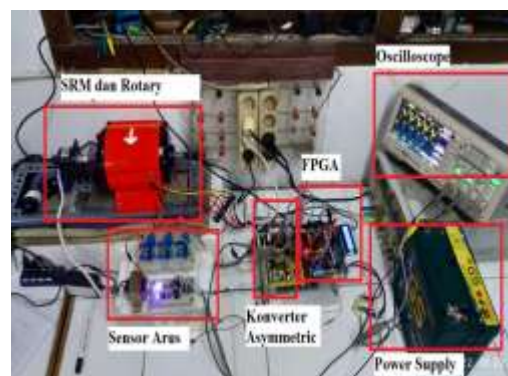


Gambar 7. *Flowchart* urutan penyalaaan sistem kendali kecepatan *SRM*

Dari *flowchart* diatas dapat digunakan sebagai parameter pengujian *hardware switched reluctance motor*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Guna mendukung penelitian ini maka dilakukan uji laboratorium sebagai validasi. Berdasarkan metode penelitian yang sudah ada pada sistem kendali kecepatan *SRM*, maka dilakukan pengujian pada *hardware SRM* di laboratorium.



Gambar 8. *Hardware* untuk pengambilan data

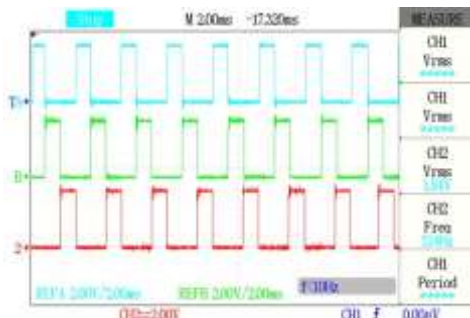
Kendali Kecepatan *Switched Reluctance Motor* Berbasis *FPGA*

Pada Gambar 8 merupakan *hardware* kendali kecepatan motor yang terdiri dari *SRM* tiga fasa, *rotary encoder*, *FPGA*, konverter asimetris, rangkaian daya MOSFET. Dibawah ini adalah parameter *hardware switch reluctance motor* yang digunakan pada pengujian laboratorium disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter alat penelitian *SRM*

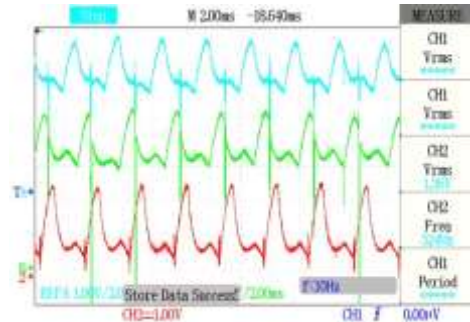
Parameter	Nilai	Satuan
Motor		
Stator	12	-
Rotor	8	-
Resistansi	4.5	Ohm
Induktansi	1.4	mH
Tegangan	12	Volt
Rotary encoder single - ended		
Pin A	2500	PPR
Pin Z	1	Impuls
Tegangan	5	Volt
FPGA Cyclone IV EP4CE6E22C8N		
Clock	50	Mhz
Memori	16	Mbit
Power Supply	5	Volt
Konverter Asimetris 3 fasa		
TLP		
MOSFET IRFP 250N		
<i>Dc Link</i>	12	Volt

Alat uji penelitian dapat diimplementasikan dengan menambahkan pengaturan *PWM* penyalan pada tiap fasanya sesuai parameter alat *SRM* yang terdapat pada Tabel 1.



Gambar 9. Hasil pengujian sinyal *PWM* pada sinyal modulasi 1500

Pola pensaklaran yang terdapat dari Gambar 9 menunjukkan bahwa satu putaran terdapat delapan kali proses pola pensaklaran sekuensial disetiap fasa. Dalam proses pensaklarannya mengalami pergeseran fasa 15° yang berawal dari Fasa A, Fasa B, dan Fasa C, sehingga *SRM* dapat berjalan hingga optimal.

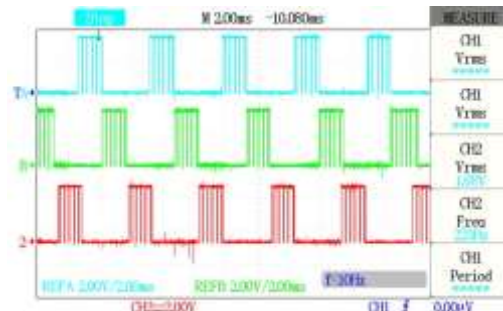


Gambar 10. Hasil pengujian arus pada sinyal modulasi 1500

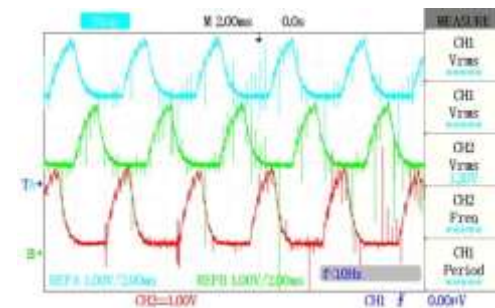


Gambar 11. Hasil pengukuran kecepatan pada sinyal modulasi 1500

Jika kecepatan putar motor semakin tinggi maka nilai *back-EMF* semakin besar nilainya, hal itu menandakan hasil keluaran daya yang dihasilkan sempurna seperti pada Gambar 10 saat *duty cycle* pada skala 100% menghasilkan arus yang tinggi dengan hasil kecepatan motor 2452 RPM.



Gambar 12. Hasil pengujian sinyal *PWM* pada kondisi sinyal modulasi 1300



Gambar 13. Hasil pengujian arus pada sinyal modulasi 1300

Kendali Kecepatan *Switched Reluctance Motor* Berbasis *FPGA*

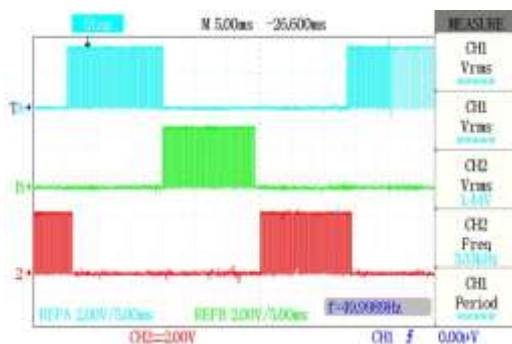
Pada Gambar 12 bentuk *PWM* pensaklaran tiap fasa mulai terisi *PWM* pengubah kecepatan, sehingga bentuk sinyal penyalan *SRM* mengalami perubahan lebar pulsa. Pada Gambar 13 bentuk arus cenderung lebih kecil karena kecepatan mulai menurun. Dengan sinyal modulasi 1300 menghasilkan kecepatan 1682 RPM.



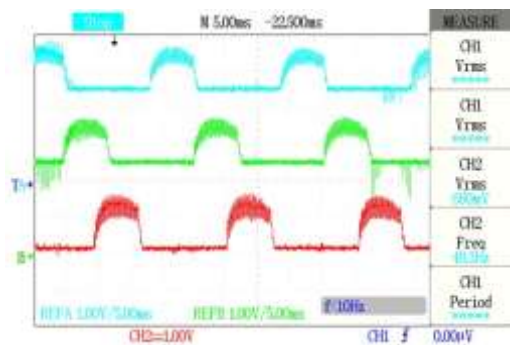
Gambar 14. Hasil pengukuran kecepatan pada sinyal modulasi 1300



Gambar 17. Hasil pengukuran kecepatan pada sinyal modulasi 1000



Gambar 15. Hasil pengujian sinyal *PWM* pada sinyal modulasi 1000



Gambar 16. Hasil pengujian arus pada sinyal modulasi 1000

Pada percobaan ketiga dengan mengatur sinyal modulasi 1000 dari sinyal *carrier* 1500 bentuk pensaklaran *SRM* saat posisi *on*, *duty cycle* didalamnya akan semakin kecil.

IV. KESIMPULAN

Pada pengujian ini dapat disimpulkan, bahwa pengaturan *PWM* pada pensaklaran dapat mempengaruhi kecepatan *SRM*. Proses kendali kecepatan *SRM* yaitu dengan mengatur *duty cycle* terjadi pada saat T_{on} pensaklaran. Percobaan pada kondisi 1 dengan mengatur sinyal modulasi 1500 pada sinyal *carrier* 1500 atau *duty cycle* 100% dihasilkan kecepatan 2454 RPM, pada kondisi 2 sinyal modulasi 1300 pada sinyal *carrier* 1500 atau *duty cycle* 85% dihasilkan kecepatan 1682 RPM, lalu pada kondisi ke 3 dengan sinyal modulasi 1000 dan sinyal *carrier* 1500 atau *duty cycle* 65% dihasilkan kecepatan 610 RPM. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil nilai sinyal modulasi dari kendali *FPGA* maka semakin rendah *duty cycle* dan RPM yang dihasilkan, dan sebaliknya semakin besar nilai sinyal modulasi maka semakin tinggi *duty cycle* dan RPM yang dihasilkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh skema Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT) tahun 2022.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Cheng, Z. Wang, S. Yang, J. Huang, and X. Ge, "An Integrated SRM Powertrain Topology for Plug-In Hybrid Electric Vehicles with Multiple Driving and Onboard Charging Capabilities," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 6, no. 2, pp. 578–591, 2020, doi: 10.1109/TTE.2020.2987167.
- [2] C. Gan, J. Wu, Q. Sun, W. Kong, H. Li, and Y. Hu, "A Review on Machine Topologies and Control Techniques for Low-Noise Switched Reluctance Motors in Electric Vehicle Applications," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 31430–31443, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2837111.
- [3] Q. A. Al-Haija, M. Al-Ja'Fari, and M. Smadi, "A comparative study up to 1024 bit Euclid's GCD algorithm FPGA implementation and synthesizing," *Int. Conf. Electron. Devices, Syst. Appl.*, 2017, doi:

- 10.1109/ICEDSA.2016.7818535.
- [4] Y. Lan *et al.*, “Switched reluctance motors and drive systems for electric vehicle powertrains: State of the art analysis and future trends,” *Energies*, vol. 14, no. 8, 2021, doi: 10.3390/en14082079.
- [5] A. D. Wardani, S. Riyadi, L. H. Pratomo, and F. B. Setiawan, “Peningkatan Efisiensi Kinerja Switched Reluctance Motor dengan Metode Pergeseran Sudut Fasa,” *Teknik*, vol. 42, no. 1, pp. 253–259, 2021, doi: 10.14710/teknik.v42i3.33970.
- [6] A. P. Khedkar and P. S. Swami, “Comparative study of asimetris bridge and split AC supply konverter for switched reluctance motor,” *6th Int. Conf. Comput. Power, Energy, Inf. Commun. ICCPEIC 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 522–526, 2018, doi: 10.1109/ICCPEIC.2017.8290421.
- [7] S. Riyadi, “A simple method to control the excitation angle for switched reluctance motor,” *Indones. J. Electr. Eng. Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 384–393, 2021, doi: 10.52549/ijeei.v9i2.2814.
- [8] G. D. Wahyu and S. Riyadi, “PWM Control Strategy of Regenerative Braking to Maximize the Charging Current into the Battery in SRM Drive,” *Proc. - 2019 Int. Semin. Appl. Technol. Inf. Commun. Ind. 4.0 Retrospect. Prospect. Challenges, iSemantic 2019*, pp. 523–527, 2019, doi: 10.1109/ISEMANTIC.2019.8884342.
- [9] S. Riyadi, “Control strategy for switched reluctance motor with rotary encoder based rotor position detection,” *Adv. Electr. Electron. Eng.*, vol. 16, no. 3, pp. 261–270, 2018, doi: 10.15598/aece.v16i3.2545.
- [10] Shihab, B. M., Che, H. S., & Hew, W. P. Symmetrical six-phase PWM methods using similar and dissimilar zero-sequence signals injection. 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016) . doi:10.1049/cp.2016.1335
- [11] X. Zan, Z. Jiang, K. Ni, W. Zhang, Y. Gong, and N. Wu, “Modular battery management for SRM drives in hybrid vehicles based on a novel modular konverter,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 136296–136306, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3011451.
- [12] M. Kulon, K. Majalengka, K. Majalengka, and J. Barat, “Analisis pengaruh dutycycle dan frekuensi terhadap kecepatan motor listrik,” no. 103, 2020.
- [13] R. A. Nugroho, “Perbandingan Penyalaan Sudut Fasa Pada SRG Guna Meningkatkan Kinerja Untuk Memaksimalkan Keluaran Daya,” *Cyclotron*, vol. 4, no. 2, pp. 13–17, 2021, doi: 10.30651/cl.v4i2.7451.
- [14] R. AMALIA, S. RIYADI, F. B. SETIAWAN, and L. H. PRATOMO, “Peningkatan Kinerja Switched Reluctance Generator dengan Pergeseran Sudut Penyalaan,” *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 9, no. 3, p. 690, 2021, doi: 10.26760/elkomika.v9i3.690.
- [15] N. Kusumaningrum, S. Riyadi, L. H. Pratomo, and F. B. Setyawan, “Optimalisasi Pengereman Regeneratif dengan Perubahan Sudut Eksitasi pada Pulsa Tunggal,” *J. Tek. Elektro*, vol. 13, no. 1, pp. 1–9, 2021, doi: 10.15294/jte.v13i1.28600.