

PROTEKSI *OVERHEAT* PADA PENGENDALI MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT UNTUK BECAK LISTRIK DENGAN SENSOR SUHU MENGGUNAKAN XMC1302

Kukuh Trisna Pambudi^{1*}, Eka Firmansyah², Muhammad Dyffa Dhiya'ulhaq Priambodo², Fadel Muhammad²

¹Jurusan Teknik Elektro, Teknik Mekatronika, dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik Universitas Tidar; Jl. Kapten Suparman 39 Potrobangsari, Magelang Utara, Jawa Tengah; [0293\) 364113](https://doi.org/10.23960/jitet.v14i1.8981)

²Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada; Komplek Fakultas Teknik UGM, Jl. Grafika No.2, Yogyakarta, Sendowo, Sinduadi, Kec. Mlati, Kota Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta; [0274\) 552305](https://doi.org/10.23960/jitet.v14i1.8981)

Keywords:

Pengendali motor, BLDC, Becak Listrik, Proteksi Overheat, Block Commutation

Correspondent Email:

kukuh@untidar.ac.id

Abstrak. Pengendali motor BLDC pada kendaraan listrik ringan seperti becak listrik rentan mengalami kenaikan suhu berlebih akibat arus tinggi dan operasi kontinu, yang dapat menurunkan keandalan sistem. Penelitian ini mengimplementasikan pengendali motor BLDC berbasis mikrokontroler Infineon XMC1302 menggunakan metode block commutation dengan sensor Hall serta sensor suhu thermistor NTC sebagai proteksi termal. Data suhu diakuisisi melalui ADC terintegrasi dan digunakan untuk mengatur duty cycle PWM secara adaptif melalui mekanisme degradasi throttle. Hasil pengujian menunjukkan duty cycle mulai menurun ketika suhu melebihi 50 °C dan dihentikan sepenuhnya di atas 70 °C. Pengujian laboratorium dan lapangan pada becak listrik menunjukkan penurunan grafik kecepatan secara kontinu seiring kenaikan suhu, yang membuktikan bahwa sistem proteksi suhu bekerja efektif dalam meningkatkan keandalan pengendali motor.



Copyright © [JITET](https://doi.org/10.23960/jitet.v14i1.8981) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. BLDC motor controllers in light electric vehicles such as electric pedicabs are prone to excessive temperature rise due to high current and continuous operation, which may reduce system reliability. This study implements a BLDC motor controller based on the Infineon XMC1302 microcontroller using a Hall-sensor-based block commutation method and an NTC thermistor for thermal protection. Temperature data are acquired through the integrated ADC and used to adaptively regulate the PWM duty cycle via a throttle derating mechanism. Experimental results show that the duty cycle starts to decrease when the temperature exceeds 50 °C and is completely disabled above 70 °C. Laboratory and field tests on an electric pedicab demonstrate a continuous reduction in the speed profile as temperature increases, confirming effective thermal protection performance.

1. PENDAHULUAN

Permintaan akan kendaraan listrik ringan yang efisien dan andal terus meningkat seiring kebijakan global untuk mengurangi emisi dan ketergantungan bahan bakar fosil. Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) dipilih

secara luas sebagai penggerak utama pada kendaraan listrik karena memiliki efisiensi tinggi, densitas daya yang baik, dan umur operasional panjang dibanding motor DC konvensional. Dalam konteks aplikasi mobilitas urban seperti becak listrik, motor BLDC dengan

daya sekitar 1 kW menjadi pilihan yang cocok untuk menopang beban dinamis sambil memenuhi syarat performa energik dan responsif. Namun pada praktiknya, permasalahan seperti kenaikan suhu berlebih akibat beban tinggi, respon throttle yang kurang adaptif, serta harmonisa tegangan akibat pensaklaran PWM pada inverter tiga fase dapat mempengaruhi keandalan dan umur sistem penggerak motor BLDC. Kebutuhan sistem pengendalian yang tidak hanya konsisten dalam pengaturan kecepatan tetapi juga mampu memantau parameter operasional seperti suhu dan arus secara real-time menjadi aspek krusial dalam mendesain motor drive yang robust [1], [2].

Sejumlah penelitian telah mengupayakan perbaikan performa pengendalian BLDC melalui berbagai pendekatan kendali lanjutan dan monitoring parameter. Misalnya, penelitian parameter identification & real-time speed control yang menggabungkan identifikasi parameter motor dan kontrol PI dengan low-pass filtering untuk mencapai tracking kecepatan yang akurat dan stabil secara real-time menunjukkan kerangka metodologis yang teruji secara eksperimental [3],[4]. Studi lain menjelajah kontrol kecepatan dengan berbagai strategi hybrid seperti kombinasi FOC, hysteresis current control (HCC), dan sliding-mode control yang terbukti mengurangi ripple torsi serta meningkatkan tracking kecepatan di berbagai kondisi beban pada kendaraan listrik berbasis sumber energi ganda [5]. Meski demikian, integrasi langsung antara throttle control, monitoring suhu motor, dan proteksi overheat dalam satu arsitektur pengendali berbasis ADC terintegrasi pada MCU seperti Infineon XMC1302 masih kurang dibahas secara komprehensif di literatur saat ini, sehingga menjadi celah penting yang ditargetkan oleh penelitian ini untuk menghasilkan sistem pengendalian BLDC yang adaptif terhadap kondisi beban sambil menjaga keselamatan termal secara real-time.

Paper ini membahas implementasi sensor suhu untuk proteksi *overheating* melalui *throttle input* menggunakan mikrokontroler infineon XMC1302 dengan bantuan aplikasi ADC yang terintegrasi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Motor BLDC

Motor Brushless Direct Current (BLDC) merupakan motor sinkron yang menggunakan magnet permanen pada rotor dan lilitan stator tiga fasa yang dikendalikan secara elektronik. Tidak adanya sikat mekanik menyebabkan motor BLDC memiliki efisiensi tinggi, densitas daya besar, tingkat kebisingan rendah, serta umur pakai lebih panjang dibandingkan motor DC konvensional. Oleh karena itu, motor BLDC banyak digunakan pada aplikasi kendaraan listrik ringan hingga menengah, termasuk sepeda dan becak listrik dengan daya sekitar 1 kW, yang membutuhkan torsi awal besar dan keandalan tinggi [6],[7].

Pengendalian motor BLDC umumnya dilakukan menggunakan metode block (trapezoidal) commutation enam-langkah (six-step commutation) dengan bantuan sensor Hall untuk mendeteksi posisi rotor. Berdasarkan kombinasi logika sensor Hall, pengendali akan menentukan pasangan saklar inverter yang aktif dan mengatur besar kecilnya tegangan fasa menggunakan teknik Pulse Width Modulation (PWM). Metode ini relatif sederhana, memiliki kebutuhan komputasi rendah, dan sangat sesuai untuk sistem tertanam berbasis mikrokontroler pada kendaraan listrik. Namun, pada kondisi beban tinggi, rugi daya pensaklaran dan arus dapat meningkatkan suhu motor dan pengendali, sehingga diperlukan integrasi strategi pengendalian suhu untuk menjaga keandalan sistem [8],[9].

2.2. Inverter 3-Fase Pengendali Motor BLDC

Inverter 3 fase merupakan komponen elektronik daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan DC dari sumber baterai menjadi tegangan AC tiga fase dengan frekuensi dan amplitudo yang dapat diatur, sehingga dapat menghasilkan medan magnet berputar yang diperlukan untuk menggerakkan motor BLDC. Struktur inverter umumnya terdiri dari tiga pasang saklar semikonduktor (mis. MOSFET/IGBT) yang membentuk jembatan penuh (full-bridge) untuk setiap fasa, dikendalikan oleh sinyal PWM yang dihasilkan oleh mikrokontroler atau unit kendali digital. Pengaturan saklar ini harus disesuaikan dengan kebutuhan komutasi motor agar arus fasa yang dihasilkan membentuk gelombang AC yang tepat dan sesuai dengan posisi rotor yang dibaca

oleh sensor Hall atau teknik back-EMF, khususnya pada BLDC yang menggunakan metode six-step commutation atau PWM trapezoidal untuk menghasilkan pulsa fase AC tiga fase tersebut [10],[11].

Desain dan implementasi inverter 3 fase untuk BLDC motor drive banyak dibahas dalam literatur sebagai bagian integral dari sistem pengendalian kecepatan dan torsi motor. Misalnya, Masdi dan Yanto mengembangkan motor driver tiga fase yang mengintegrasikan inverter dan mikrokontroler untuk mengatur sinyal PWM berdasarkan input Hall dan frekuensi yang diinginkan sehingga motor dapat dikendalikan kecepatannya secara efektif [10]. Selain itu, terdapat pendekatan six-step PWM menggunakan unit pengendali yang menghasilkan pulsa akurat untuk inverter tiga fase, yang meningkatkan kualitas tegangan keluaran serta respon dinamis BLDC pada berbagai beban [12]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa topologi dan strategi pengendalian inverter secara langsung mempengaruhi efisiensi daya, harmonisa output, dan performa termal, aspek penting dalam sistem BLDC daya menengah hingga tinggi seperti 1 kW [13].

2.3. Mikrokontroler Infineon XMC1302

Infineon XMC1302 merupakan mikrokontroler berbasis ARM Cortex-M0 yang dirancang khusus untuk aplikasi kontrol motor dan sistem daya dengan kebutuhan komputasi menengah dan efisiensi tinggi. Mikrokontroler ini dilengkapi dengan PWM beresolusi tinggi (CCU4/CCU8), ADC cepat terintegrasi, serta timer yang sinkron, sehingga sangat sesuai untuk implementasi pengendalian motor BLDC menggunakan metode block (six-step) commutation berbasis sensor Hall. Keunggulan utama XMC1302 terletak pada kemampuan menghasilkan sinyal PWM presisi dengan jitter rendah, integrasi peripheral analog yang memadai untuk pembacaan arus dan suhu, serta konsumsi daya yang rendah, sehingga banyak digunakan pada aplikasi pengendali motor kendaraan listrik ringan dan sistem industri berskala kecil hingga menengah [14].

2.4. DAVE Apps 4.4.2

DAVE™ (*Digital Application Virtual Engineer*) APPS merupakan lingkungan pengembangan berbasis model dan konfigurasi grafis yang disediakan oleh Infineon untuk

keluarga mikrokontroler XMC, termasuk XMC1302, yang ditujukan untuk mempercepat pengembangan aplikasi kontrol motor. Melalui DAVE APPS, konfigurasi peripheral penting seperti PWM (CCU4/CCU8), ADC, timer, dan antarmuka sensor Hall dapat dilakukan secara modular dan terintegrasi tanpa penulisan kode tingkat rendah secara manual. Pendekatan ini memberikan keunggulan berupa reduksi waktu pengembangan, konsistensi konfigurasi hardware-software, serta keandalan sistem yang lebih tinggi, sehingga sangat sesuai untuk implementasi pengendalian motor BLDC berbasis block (six-step) commutation yang membutuhkan sinkronisasi presisi antara PWM, pembacaan posisi rotor, dan pengolahan sinyal sensor [15].

2.5. Kendali Suhu & Throttle

Beragam implementasi penelitian motor Brushless DC (BLDC) telah menunjukkan bagaimana sistem kendali dan monitoring parameter dapat meningkatkan performa dan keandalan operasi BLDC dalam konteks aplikasi nyata. Salah satu contoh adalah embedded instrumentation system untuk kendaraan listrik yang dirancang untuk memonitor parameter penting seperti kecepatan, arus, tegangan, dan suhu secara real-time melalui sistem akuisisi data berbasis mikrokontroler, yang terbukti akurat dalam menampilkan kondisi operasional kendaraan listrik dan mendukung pengambilan keputusan kendali lanjutan [1]. Selain itu, penelitian lain mengembangkan monitoring dan fault detection platform real-time yang terintegrasi dengan algoritma proteksi untuk meningkatkan reliability sistem BLDC dengan deteksi dini kesalahan dan parameter abnormal melalui pemrosesan sinyal yang terus menerus, sehingga membantu pemeliharaan preventif dan operasi yang lebih aman [2]. Implikasi dari studi-studi ini jelas menunjukkan pentingnya integrasi antara kendali motor, pembacaan sensor, dan sistem monitoring parameter dalam rangka meningkatkan performa sistem BLDC pada aplikasi seperti kendaraan listrik ringan hingga menengah.

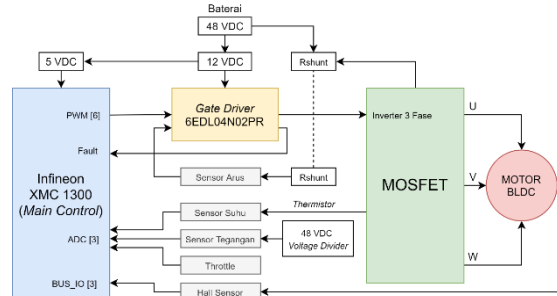
3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengendalikan motor BLDC pada becak dengan daya 1500W pada tegangan 48V menggunakan mikrokontroler infineon

XMC1302. Algoritma pengendalian yang digunakan adalah metode *Block Commutation* dengan masukan 3 sensor posisi *hall effect*. Perangkat lunak yang digunakan adalah DAVE 4.4.2 dengan memakai fitur APPs yang ada untuk mengolah data-data masukan, memprogram sistem proteksi, dan memproses metode *block commutation*. Sensor suhu digunakan untuk mengendalikan besaran *throttle* ketika terjadi *overheat* ($>70^{\circ}\text{C}$).

3.1. Gambaran Umum Sistem Pengendali

Secara garis besar, sistem pengendali yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan dengan diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem Pengendali Motor BLDC

Main Control merupakan bagian yang berfungsi untuk melakukan pemrosesan algoritma pengendalian dan fungsi pengendali. Unit pemroses akan mengambil data dari bagian input yang kemudian akan diolah untuk diberikan kepada sistem atau disebut dengan output. Unit pemroses yang digunakan adalah XMC1302-TO38x0200 dari *Infineon Technology*.

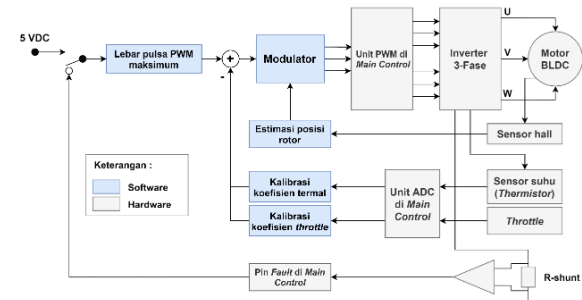
Unit pemroses atau *main control* membutuhkan input baik yang diberikan oleh pengguna maupun input respon dari sistem untuk umpan balik. Input yang diberikan oleh pengguna adalah *throttle*. Sedangkan, input yang berasal dari sistem berupa sensor arus, sensor tegangan, sensor suhu, pin FAULT, dan *hall sensor*. Output sistem berupa pulsa PWM, dan sinyal pin ENABLE. Output pulsa PWM terdiri dari enam pulsa untuk input kaki gate mosfet sisi atas dan sisi bawah pada masing-masing lengan. Output berupa sinyal ENABLE digunakan sebagai input gate driver bahwa fungsi gate driver dijalankan.

Inverter tiga fase digunakan untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC 3 fase. Inverter tiga fase memiliki tiga buah lengan

dengan satu sisi atas dan satu sisi bawah pada setiap lengannya. Tiap sisi memiliki satu pasang MOSFET yang dipasang secara paralel dan dikendalikan oleh pulsa PWM dari gate driver.

3.2. Skema Pengendalian

Secara garis besar, urutan kerja sistem pengendalian eSemar ditunjukkan dengan diagram alir pada Gambar 2.



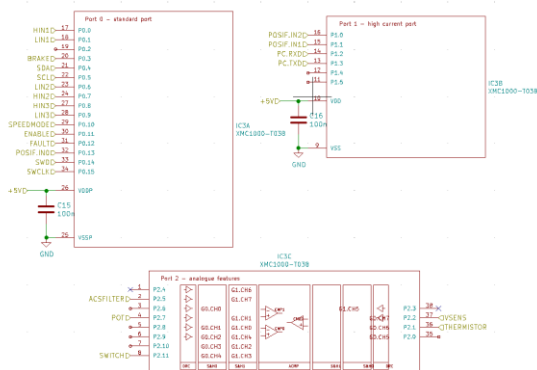
Gambar 2. Diagram Alir Pengendalian.

Motor akan berjalan menggunakan metode *block commutation* dengan bacaan *hall sensor*, *throttle*, dan sensor suhu sebagai input. Ketika tidak ada error pada saat pembacaan suhu dan *throttle* maka sinyal PWM akan dibangkitkan dan diteruskan menuju gate driver. Input dari sensor suhu akan menjadi penentu adanya degradasi *duty cycle* melalui luaran *throttle* sehingga terjadi pengurangan arus luaran inverter. Program juga akan berhenti jika terjadi error pada kondisi menjalankan motor atau motor dalam keadaan idle jika tidak ada data masukan *throttle*.

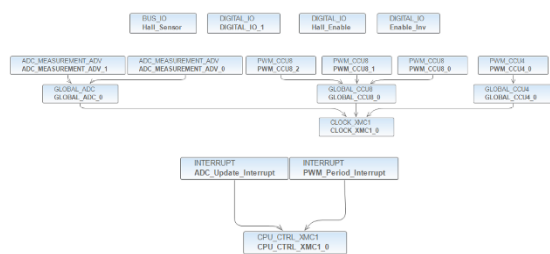
3.3. Konfigurasi Pengendali pada XMC1302 dengan DAVE Apps 4.4.2

Penelitian ini menggunakan dua perangkat lunak yaitu DAVE 4.4.2 dan Micrium uC Probe XMC. Dave merupakan sebuah compiler yang dirancang khusus untuk mengatur kerja produk mikrokontroler XMC milik Infineon. DAVE menggunakan apps dalam perancangan programnya. Selain DAVE, digunakan juga perangkat lunak Micrium untuk memantau kinerja pemrograman pada mikrokontroler XMC tersebut. Untuk debugging dan monitoring digunakan I2C (inter-integrated circuit) dengan perantara downloader melalui pin TX, RX, SCL (synchronous clock), dan SDA (synchronous data) sebagai alat komunikasi unit pemroses dengan PC (personal computer). Konfigurasi pin dan konektivitas apps pada program

pengendalian dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Konfigurasi Pin Unit Pemroses XMC1302.



Gambar 4. *Software Apps Connectivity* pada DAVE Apps 4.4.2.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengolahan Data Analog

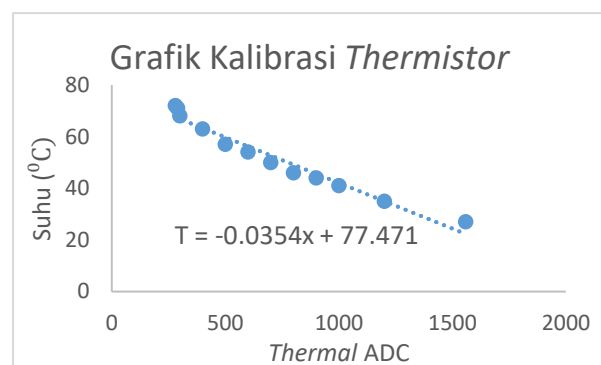
Pengolahan data analog meliputi bacaan sensor tegangan, sensor suhu, dan *throttle*. Data-data tersebut nantinya akan diubah menjadi data digital dengan konversi 12-bit yang kemudian digunakan untuk mengatur keluaran *inverter* secara otomatis demi kebutuhan keamanan sistem. *Apps* yang digunakan adalah ADC_MEASUREMENT_ADV_0 dan ADC_MEASUREMENT_ADV_1. *Apps* ADC pertama berfungsi untuk mengambil data input tegangan DC dan *thermistor* sedangkan *apps* ADC kedua berfungsi untuk mengambil data *throttle*.

4.1.1. *Pengolahan Data Sensor Suhu*

Pengolahan data analog sensor suhu diambil dari besar nilai resistansi termistor yang diletakkan pada heatsink sisi bagian dalam. *Port* yang digunakan adalah P2.1 (THERMISTOR) pada mikrokontroler. *Thermistor* memiliki besaran yang semakin

kecil nilainya apabila terpapar suhu yang semakin tinggi.

Kalibrasi *thermistor* dilakukan dengan cara mencari hubungan nilai *thermistor* hasil konversi ADC menggunakan Micrium uC Probe dan suhu MOSFET menggunakan *thermal cam*. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan board ke komputer dan bagian *heatsink* dipanaskan menggunakan *heat gun*. Kemudian, dilakukan pengambilan beberapa data tersebut lalu ditentukan persamaan linearnya untuk menampilkan besar suhu pada Micrium uC Probe. Berikut adalah grafik hasil kalibrasi *thermistor*.

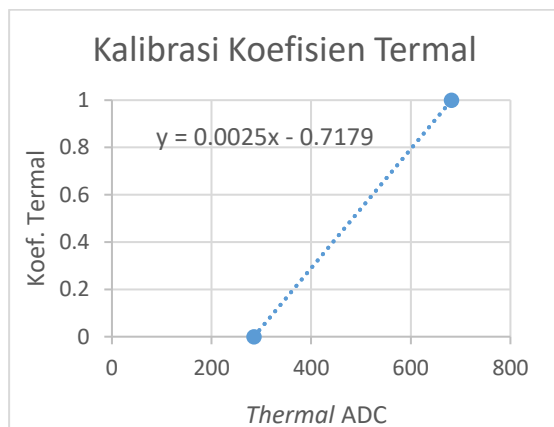


Gambar 5. Grafik Kalibrasi *Thermistor*.

Selanjutnya, untuk pengaturan kontrol motor mulai ditentukan pada saat kisaran suhu MOSFET mencapai 50°C hingga 70°C atau nilai *thermistor* ADC sebesar 682 sampai dengan 285. Kemudian, ditambahkan koefisien termal sebagai pengali pada kalkulasi pembangkitan sinyal PWM. Berikut adalah tabel hasil kalibrasi serta program kontrol suhu.

Tabel 1. Tabel Hasil Kalibrasi Sensor Suhu.

Duty (%)	Therm. ADC	Suhu	Suhu Linear	Koefisien Thermal
100	1.558	27	22,3178	1
100	1.200	35	34,991	1
100	1.000	41	42,071	1
100	900	44	45,611	1
100	800	46	49,151	1
100	700	50	52,691	1
73,64	600	54	56,231	0,7821
53,92	500	57	59,771	0,5321
34,65	400	63	63,311	0,2821
15,81	300	68	66,851	0,0321
12	290	71	67,205	0,0071
0	280	72	67,559	-0,0179
Kontrol	682		53.3282	0.9871
	285		67.382	-0.0054

Gambar 6. Grafik Kalibrasi Koefisien *Thermal*.

4.1.2. Pengolahan Data Analog *Throttle*

Pengolahan data analog *throttle* dilakukan dengan cara yang sama, namun variabel rentang nilai ADC-nya sudah ditetapkan yaitu sebesar 800 sampai dengan 2800. *Port* yang digunakan adalah P2.7 (POT) pada mikrokontroler. Agar nilai *throttle* dapat mempengaruhi kalkulasi lebar pulsa PWM yang dibangkitkan maka dilakukan kalibrasi koefisien rasional *throttle* sehingga rentang nilai 800 sampai dengan 2800 menjadi nol sampai dengan satu. Hal ini ditujukan agar motor tidak berjalan secara tiba-tiba ketika *throttle* tidak sengaja terputar. Selain itu, ditambahkan juga pengaturan jika nilai *throttle* ADC kurang dari 800 maka motor diam dan jika lebih dari 2800 maka nilai koefisien tetap satu.

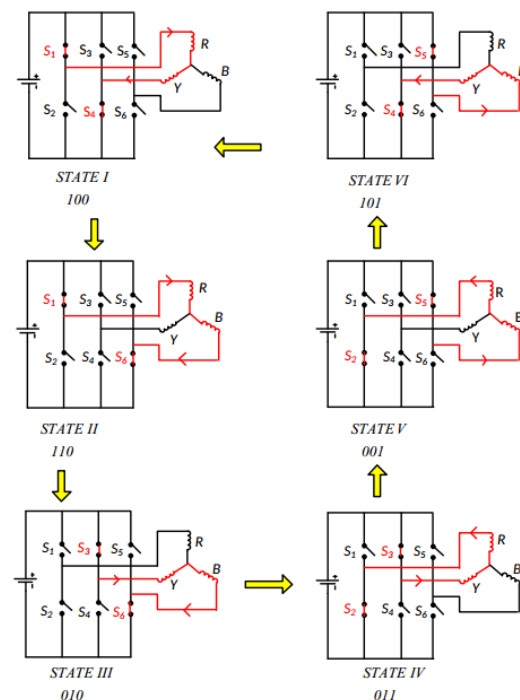
4.2. Pengolahan Metode *Block Commutation*

Pengolahan metode *Block Commutation* dilakukan di mikrokontroler menggunakan *port* P0.0, P0.1, P0.6, P0.7, P0.8, dan P0.9 (HIN1, LIN1, LIN2, HIN2, HIN3, dan LIN3) yang kemudian dilanjutkan menuju *gate driver* untuk dinaikkan tegangannya menjadi 12 V lalu melakukan *pensaklaran* MOSFET. HIN1 dan LIN1 merupakan representasi fase U, HIN2 dan LIN2 fase V, serta HIN3 dan LIN3 fase W. HIN adalah sisi *high* dan LIN adalah sisi *low* pada tiap fase. Untuk dapat mengatur pembangkitan sinyal PWM dibutuhkan input data berupa lebar pulsa PWM maksimum, koefisien rasional *throttle*, dan koefisien termal. Untuk pengaturan lebar pulsa PWM atau *duty cycle* digunakan *apps* ADC_UPDATE_INTERRUPT dengan fungsi Update_ADC_IRQ pada programnya.

Sedangkan, untuk menjalankan rangkaian *inverter* dibutuhkan urutan input *hall sensor* serta urutan pembangkitan tiap fase motor baik sisi *high* dan *low* agar motor dapat berputar. Skema urutan pembangkitan tiap fase motor BLDC dijelaskan melalui Tabel 2 dan Gambar 7.

Tabel 2. Enam Kondisi Sensor *Hall-effect* [16].

States	Hall A	Hall B	Hall C	Switches to be ON	The active lines of the stator winding
I	1	0	0	S ₁ , S ₄	RY
II	1	1	0	S ₁ , S ₆	RB
III	0	1	0	S ₃ , S ₆	YB
IV	0	1	1	S ₃ , S ₂	YR
V	0	0	1	S ₅ , S ₂	BR
VI	1	0	1	S ₅ , S ₄	BY

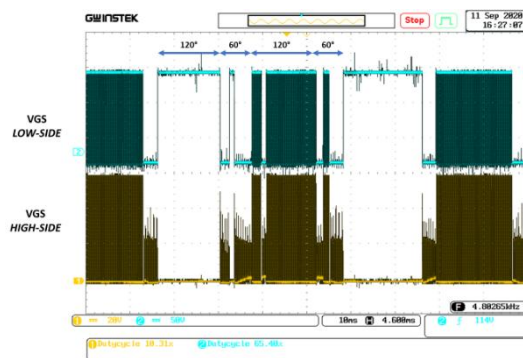
Gambar 7. Enam Kondisi Pembangkitan Sinyal *Block Commutation* Motor BLDC [16].

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa setiap kondisi atau *state* sensor hall memiliki ketentuan *switch* atau MOSFET mana yang harus mengeluarkan sinyal, arah arusnya, dan urutan kerjanya. Sehingga, apabila urutan kerjanya kita sesuaikan dengan komposisi bit pada masing-masing kondisi atau *states* didapatkan urutan sensor *hall* 4 (100), 6 (110), 2 (010), 3 (011), 1 (001), dan 5 (101). Namun, perlakuan *pensaklaran* tiap MOSFET atau arah arus yang masuk ke motor tidak selalu

ditentukan oleh kondisi *sensor hall* seperti pada gambar karena posisi *hall sensor* tiap motor berbeda-beda. Sehingga, penulisan program diurutkan dari kerja tiap fasenya dahulu baru kemudian urutan nilai *sensor hall* disesuaikan. Apps yang mengatur proses *pensaklaran* adalah PWM_CCU8 dengan fungsi PWM_Period_Handler pada program.

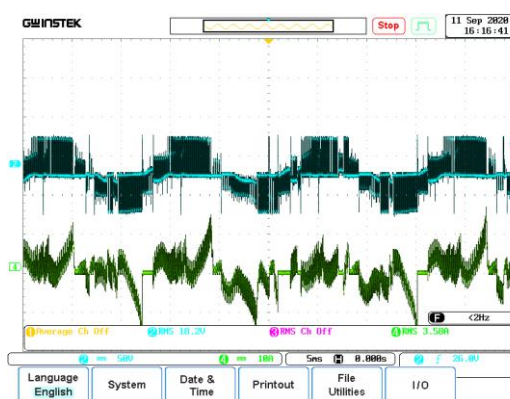
4.3. Pengujian Metode Block Commutation

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan program pengendalian *block commutation* berjalan dengan baik. Sinyal V_{GS} *high-side* MOSFET berkomplemen dengan sinyal V_{GS} *low-side* MOSFET, kecuali saat V_{GS} *high-side* MOSFET berada dalam kondisi *toggle OFF*. Ketiga kondisi sinyal V_{GS} memiliki porsi yang sama yaitu sebesar 120° pada setiap satu *electrical revolution* seperti pada Gambar 8.



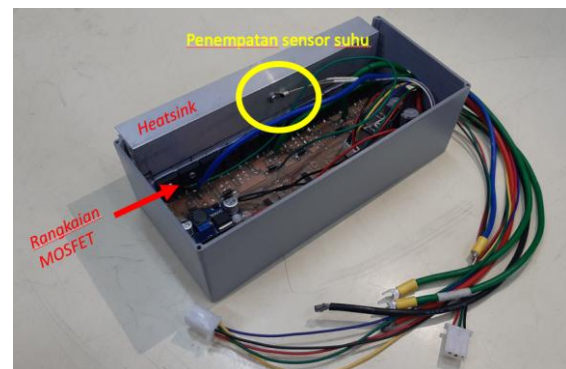
Gambar 8. Sinyal Gating MOSFET pada Salah Satu Lengan.

Bentuk gelombang arus dan tegangan keluaran pengendali dengan metode *block commutation* ditunjukkan pada Gambar 9. Arus (Hijau) dan Tegangan (Biru) Keluaran Pengendali.. Bentuk arus keluaran adalah *trapezoidal*.



Gambar 9. Arus (Hijau) dan Tegangan (Biru) Keluaran Pengendali.

4.4. Pengujian Overheat Protection



Gambar 10. Penempatan suhu pada board pengendali.

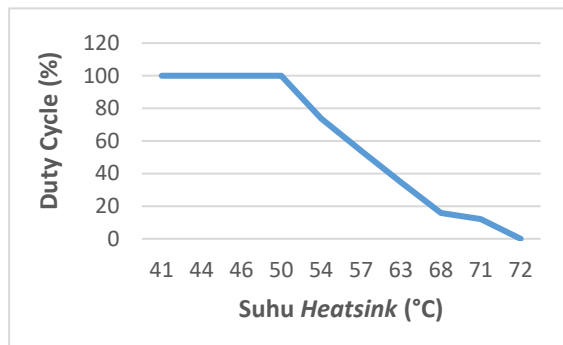
Pengujian ini dilakukan dengan menjalankan motor BLDC dan menggunakan *hot blower* untuk membantu memberikan panas pada *heatsink*. Data yang diambil adalah suhu pada *thermistor NTC* yang diukur dengan *thermal camera* dan *duty cycle* maksimum yang dapat dihasilkan oleh unit pemroses. Proteksi pada program diatur untuk mulai bekerja pada suhu sekitar 50°C hingga 70°C sebelum akhirnya unit pemroses mengatur *duty cycle* yang dikeluarkan menjadi 0%. Nilai rentang suhu proteksi tersebut diambil dibawah suhu kerja maksimal dari MOSFET. Penempatan sensor suhu diletakkan sesuai pada Gambar 10.

Tabel 3. Hasil Pengujian *Overheat Protection*.

ADC Suhu Terbaca	Suhu pada Sensor ($^\circ\text{C}$)	Duty Cycle Maksimal (%)
1.000	41	100
900	44	100
800	46	100
700	50	100
600	54	74
500	57	54
400	63	35
300	68	16
290	71	12
280	72	0

Gambar 1 menunjukkan semakin tinggi suhu pada *heatsink* maka *duty cycle* akan menurun secara linear. *Duty cycle* menurun ketika suhu pada *heatsink* melebihi 50°C . Ketika suhu *heatsink* mencapai 54°C *duty cycle* yang dihasilkan unit pemroses sebesar 74%. Tidak ada *duty cycle* yang dihasilkan ketika suhu *heatsink* lebih dari 70°C . Hal ini bertujuan

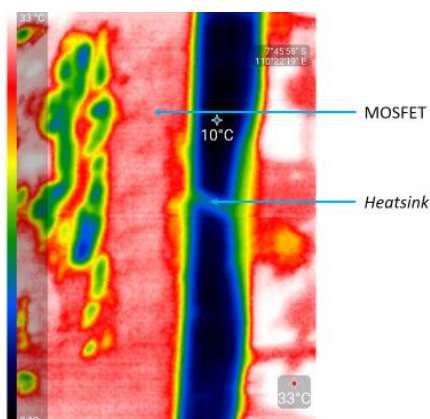
untuk menjaga agar suhu MOSFET tidak melebihi suhu kerja maksimal dengan cara menonaktifkan *duty cycle*. Batas suhu proteksi maksimal diatur dibawah suhu kerja maksimal dari MOSFET untuk menghindari kerusakan komponen. Dengan analisis tersebut, eSemar berhasil menerapkan fitur *overheat protection* dengan cara membatasi nilai *duty cycle* ketika suhu pada *heatsink* meningkat.



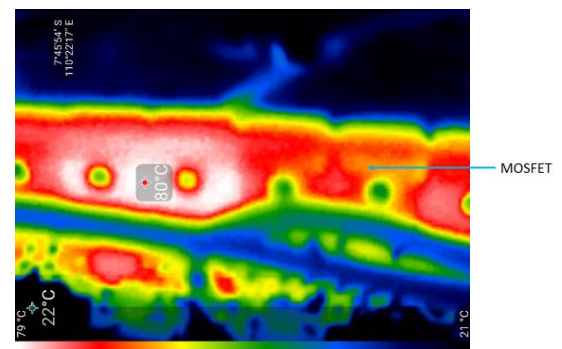
Gambar 11. Grafik Data Pengujian *Overheat Protection*.

4.5. Pengujian pada Becak Listrik

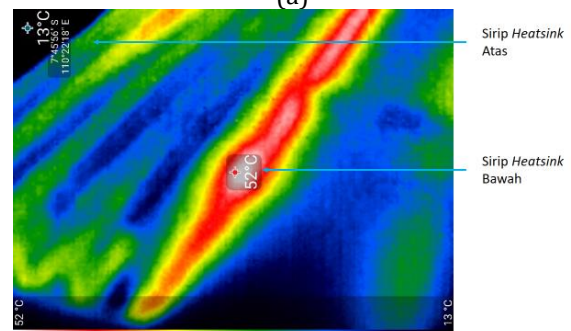
Pengujian akhir program pengendalian dilakukan dengan menjalankan becak berpenumpang tanpa berhenti sejauh satu kilometer. Pengujian dilakukan dengan pengendara yang memiliki berat 55kg serta berat penumpang total sebesar 135kg. Pengujian bertujuan untuk memastikan bahwa program dan sistem kendali motor terhadap suhu dapat berjalan dengan baik.



Gambar 12. Citra *Thermal* Perangkat Sebelum Pengujian.



(a)

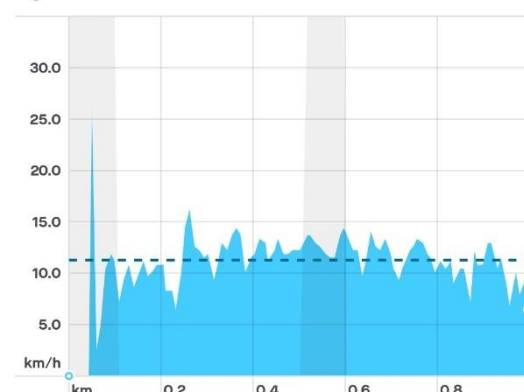


(b)

Gambar 13. Citra *Thermal* Setelah Pengujian dengan Penumpang (a) MOSFET (b) Sirip *Heatsink*.

Gambar 12 dan Gambar 13 menunjukkan citra *thermal* perangkat keras dan sistem pendingin sebelum dan setelah dilakukan pengujian becak dengan penumpang. Terlihat MOSFET mengalami kenaikan suhu sebesar 50°C dari kondisi awal menjadi 80°C. *Heatsink* juga mengalami kenaikan suhu sebesar 32°C hingga 42°C.

Speed



Gambar 14. Grafik kecepatan becak listrik.

Gambar 14 menunjukkan grafik kecepatan becak pada saat dilakukan pengujian becak dengan penumpang sejauh satu kilometer.

Terlihat bahwa terjadi penurunan kecepatan pada kilometer 0.8 ke atas. Jika mengacu pada grafik tersebut serta citra *thermal* MOSFET dan *heatsink* setelah pengujian, dapat disimpulkan bahwa sistem kendali kecepatan motor terhadap kenaikan suhu berjalan dengan baik saat becak dijalankan.

5. KESIMPULAN

- a. Sistem pengendali motor BLDC berbasis mikrokontroler Infineon XMC1302 dengan metode block commutation dan sensor Hall berhasil diimplementasikan, ditunjukkan oleh pembangkitan sinyal PWM yang sesuai, arus keluaran berbentuk trapezoidal, serta operasi motor yang stabil pada pengujian laboratorium dan lapangan.
- b. Implementasi proteksi *overheat* menggunakan sensor suhu *thermistor* NTC terbukti efektif, di mana *duty cycle* PWM diturunkan secara bertahap ketika suhu *heatsink* melebihi 50 °C dan dihentikan sepenuhnya di atas 70 °C, sehingga mampu melindungi MOSFET dari kondisi suhu berlebih.
- c. Pengujian lapangan pada becak listrik dengan beban penumpang menunjukkan penurunan kecepatan secara kontinu seiring kenaikan suhu, yang mengindikasikan bahwa sistem kendali suhu terintegrasi bekerja sesuai perancangan dan meningkatkan keandalan operasi.
- d. Sistem ini memiliki keunggulan pada kesederhanaan dan kemudahan implementasi, namun masih terbatas pada metode block commutation tanpa kendali arus tertutup; pengembangan selanjutnya dapat difokuskan pada integrasi kontrol tertutup dan metode kendali lanjutan untuk meningkatkan performa dan efisiensi sistem.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium I-Green dan Laboratorium Mesin Listrik Dasar DTETI UGM yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ulinuha A, Jatmiko, Riza AG. Design and Implementation of Data Acquisition Device and Instrumentation Based on Microcontroller for Electric Motorcycle, 2021. <https://doi.org/10.2991/aer.k.210810.004>.
- [2] Morkmechai S, Prainetr N, Prainetr S. A Novel Real-Time Monitoring and Fault Detection Platform for Enhanced Reliability in Brushless Direct-Current Motor Drive System. 2024 Int. Conf. Sci. Eng. Electron., Basel Switzerland: MDPI; 2025, p. 4. <https://doi.org/10.3390/engproc2025086004>.
- [3] Abouseda AI, Doruk RO, Amini A. Parameter Identification and Speed Control of a Small-Scale BLDC Motor: Experimental Validation and Real-Time PI Control with Low-Pass Filtering. *Machines* 2025;13:656. <https://doi.org/10.3390/machines13080656>.
- [4] Arwa AA, Ietiqal MA, Salam JY. Bald eagle search algorithm based PI control method for speed control of BLDC motor drives. *AIMS Electron Electr Eng* 2025;9:565–88. <https://doi.org/10.3934/electreng.2025025>.
- [5] Kumar A, Naik MV, Kumar R, Aman. Design and analysis of BLDC motor speed control for electric vehicles powered by solar PV and grid supply. *Discov Electron* 2025;2:60. <https://doi.org/10.1007/s44291-025-00097-4>.
- [6] Şen M, Mutluer M. A Review of BLDC Motors: Types, Application, Failure Modes and Detection. *Energies* 2025;18:6402. <https://doi.org/10.3390/en18246402>.
- [7] Zeraoulia M, Benbouzid MEH, Diallo D. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study. *IEEE Trans Veh Technol* 2006;55:1756–64. <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.878719>.
- [8] Elsadany AA, Hussein S, Al-khedhairi A, Elsonbaty A. On dynamics of 4-D blinking chaotic system and voice encryption application. *Alexandria Eng J* 2023;70:701–18. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.024>.
- [9] Sholihah RM, Fahrul F, Kurniawan A, Mahmudi I. Implementation of modified trapezoidal commutation scheme for speed control of 1 kW BLDC motor. *J Mechatronics, Electr Power, Veh Technol* 2023;14:127–37. <https://doi.org/10.14203/j.mev.2023.v14.127-137>.
- [10] Masdi H, Yanto D. Design And Implementation of Three Phase Motor Driver For PWM-Based BLDC Motor Speed Control. *Proc. 1st Int. Conf. Sustain. Eng. Dev. Technol. Innov. ICSEDTI 2022*, 11-13 Oct. 2022, Tanjungpinang, Indones., EAI; 2023. <https://doi.org/10.4108/eai.11-10->

- 2022.2326430.
- [11] Silalahi EM. ANALISIS ENERGI LISTRIK PLTS ON-GRID DENGAN BOOST CONVERTER DAN INVERTER BERBASIS MATLAB/SIMULINK. *J Inform Dan Tek Elektro Terap* 2025;13. <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i1.5959>.
 - [12] Rusli MR, Jati MP, Nugroho MAB, Qudsi OA, Sudiharto I, Murdianto FD, et al. BLDC Motor Drives with A Programmable Simplified C-Block to Generate Accurate Six-Step PWM Based on STM32 Microcontroller. *Elinvo (Electronics, Informatics, Vocat Educ* 2023;7:112–8. <https://doi.org/10.21831/elinvo.v7i2.52992>.
 - [13] Maskur MA, Qudsi OA, Ferdiansyah I. Rancang Bangun Six Step Inverter untuk Motor Brushless Direct Current Outrunner pada Sepeda Listrik. *Maj Ilm Teknol Elektro* 2024;23:19. <https://doi.org/10.24843/MITE.2024.v23i01.P03>.
 - [14] Infineon Technologies AG. XMC1300 Microcontroller Series for Motor Control Applications. Munich, Germany: 2021.
 - [15] Infineon Technologies AG. DAVE™ 4 – Digital Application Virtual Engineer for XMC. Munich, Germany: 2020.
 - [16] Nama T, Gogoi AK, Tripathy P. Application of a smart hall effect sensor system for 3-phase BLDC drives. 2017 IEEE Int. Symp. Robot. Intell. Sensors, IEEE; 2017, p. 208–12. <https://doi.org/10.1109/IRIS.2017.8250123>.