

PERANCANGAN DRIVER MOTOR CONTROLLER BLDC PADA ELECTRIC VEHICLE CAR 48V DENGAN POWER MONITORING SYSTEM BERBASIS TELEMETRY

Dhiya Uddin Rijalusalam
Fakultas Teknik, Teknik Elektro
Universitas Muhammadiyah
Yogyakarta
Yogyakarta, Indonesia
dh.rijalusalam@gmail.com

Rama Okta Wiyagi, S.T., M.Eng.
Fakultas Teknik, Teknik Elektro
Universitas Muhammadiyah
Yogyakarta
Yogyakarta, Indonesia
wiyagi@gmail.com

Kunnu Purwanto, S.T., M.Eng.
Fakultas Teknik, Teknik Elektro
Universitas Muhammadiyah
Yogyakarta
Yogyakarta, Indonesia
Kunnu_p@umy.ac.id

Intisari – Mobil Listrik merupakan mobil yang berjalan menggunakan motor listrik yang ditenagai oleh listrik dari baterai atau aki. Mobil listrik memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan mobil bertenaga bensin biasa salah satunya tidak membutuhkan bahan bakar fosil dan tidak menghasilkan gas emisi. Seiring dengan semakin populernya penggunaan mobil listrik pada saat ini mengakibatkan banyak peneliti terus melakukan penelitiannya dalam rangka meningkatkan performa, efisiensi, dan optimasi untuk menciptakan mobil listrik yang jauh lebih baik. Salah satu komponen utama Mobil Listrik adalah *Motor* dan *Controller*-nya.

Saat ini *Motor dan Controller* dibuat oleh bangsa asing, sehingga diperlukan *Research and Development* (R&D) terhadap komponen utama tersebut. Tugas Akhir ini berfokus pada desain dan pembuatan sistem driver motor controller BLDC 48V yang didalamnya terdapat fungsi *power monitoring system berbasis telemetry* untuk memudahkan proses monitoring dari motor BLDC. Hasil dari penelitian ini menghasilkan *Driver Motor Controller BLDC 48V* dengan kapasitas power 1KW. Pengaturan kecepatan motor dapat dilakukan dengan mengubah nilai Pulse Width Modulation (PWM) melalui *throttle*. Dari hasil pengujian *Driver Motor Controller* yang dilakukan didapat hasil Arus maximum yang dikonsumsi oleh Motor BLDC pada kondisi terbebani adalah 20.3A dan Daya sebesar 1000.7 dengan kecepatan 310 RPM. Selain itu sistem yang dibuat juga dilengkapi *power monitoring system* yang mampu melakukan pengukuran tegangan, kecepatan, arus dan daya dengan nilai rata-rata kesalahan <3%, dan mengirimkan data hasil pengukuran pada rentang jarak 0-100 dengan rata-rata keberhasilan sebesar 70%.

Kata Kunci : Mobil Listrik, Driver Motor BLDC, Power Monitoring System, Telemetry

I. PENDAHULUAN

Mobil listrik merupakan mobil yang berjalan menggunakan motor listrik yang ditenagai oleh listrik dari baterai atau aki. Mobil ini berbeda dengan mobil konvensional pada umumnya yang menggunakan mesin bertenaga bensin atau diesel. Mobil listrik memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan mobil bertenaga bensin biasa, diantaranya mobil listrik tidak menghasilkan gas emisi yang dapat mencemari lingkungan, tidak membutuhkan bahan bakar fosil, sehingga dapat mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan bahan bakar fosil. Bagi beberapa negara maju seperti Amerika Serikat dan banyak negara Eropa mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil menjadi hal yang cukup penting mengingat beberapa negara maju tidak memiliki banyak cadangan bahan bakar fosil. Selain itu semakin

berkurangnya harga baterai dan semakin meningkatnya performance dari baterai mobil listrik

semakin meningkatkan ketertarikan masyarakat negara maju dengan penggunaan mobil listrik.

Seiring dengan semakin populernya penggunaan mobil listrik pada saat ini mengakibatkan banyak peneliti terus melakukan penelitiannya dalam rangka meningkatkan performa, efisiensi, optimasi dan lainnya untuk menciptakan mobil listrik yang jauh lebih baik. Pemerintah Indonesia sendiri melalui Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia (RISTEKDIKTI) ikut berpartisipasi dalam mengembangkan minat mahasiswa dalam bidang mobil listrik dengan menyelenggarakan Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE).

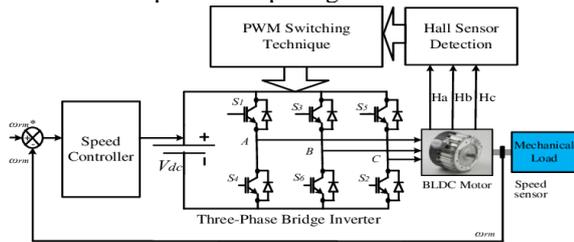
Salah satu yang diperlombakan dalam kontes mobil tersebut yaitu terkait efisiensi penggunaan energi listrik terhadap jangkauan yang dapat dicapai oleh setiap mobil. Salah satu aturan yang digunakan dalam kontes tersebut yaitu *driver motor* yang digunakan untuk menggerakkan motor listrik harus dibuat sendiri oleh setiap peserta team, sehingga setiap peserta team diwajibkan untuk membuat *driver* penggerak motor sendiri. Dengan mengacu pada aturan tersebut peneliti mencoba membuat *driver motor controller* yang dilengkapi dengan *power monitoring system* agar mempermudah dalam melakukan pengamatan konsumsi energi listrik terhadap jangkauan

yang dapat dicapai, sehingga proses efisiensi, dan optimalisasi dari mobil listrik yang dibuat dapat diamati dengan baik untuk tujuan penelitian selanjutnya.

II. Sistem Komutasi Motor Brushless DC (BLDC)

Motor BLDC merupakan salah satu jenis motor sinkron magnet permanen yang disuplai oleh sumber listrik DC pada kontrolnya. Dan membutuhkan sumber listrik AC tiga fase untuk menggerakkan bagian rotor motornya[1]. Pergerakan pada rotor ini disebabkan oleh medan magnet pada stator yang pada setiap saatnya hanya dua fase yang tersupply sementara satu fase lainnya tidak tersupply. Fenomena ini mengakibatkan motor ini seperti motor DC, karena arus yang mengalir pada kumparan stator mirip dengan motor DC, meskipun motor ini sebenarnya dialiri dengan tiga fase.

Motor BLDC menggunakan sistem komutasi *electronically commutated motor* [2]. Sistem komutasi ini terdiri dari kombinasi transistor atau biasanya menggunakan MOSFET atau IGBT yang membutuhkan sinyal atau pulsa penyalan dan dapat mengaktifkan koil dengan waktu yang tepat untuk menggerakkan motor [3]. Berikut ini merupakan diagram blok dari sistem control motor BLDC dapat dilihat pada gambar 1.

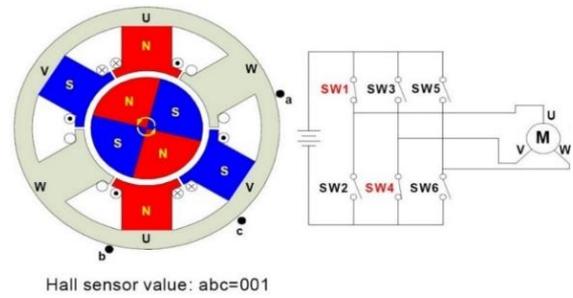


Gambar 1. Diagram Blok Sistem Control Motor BLDC (Yasien, 2018)

Pada motor BLDC bagian stator harus diberikan sinyal sesuai dengan perubahan komutasinya. Untuk itu diperlukan 3 buah hall sensor yang dapat mendeteksi bagian koil atau fase pada rotor yang telah diberikan sinyal oleh fluks magnet. Saat rotor berputar, perubahan besar medan magnet antara magnet permanen dan gaya elektromagnetik dari lilitan kawat akan dideteksi oleh sensor hall sebagai masukan dari *controller* [4]. Berikut ini merupakan tabel informasi perubahan komutasi motor berdasarkan nilai sensor hall dapat dilihat pada tabel 1 dan gambar 2 berikut.

Tabel 1. Perubahan Komutasi Sensor hall

Hall Sensor Value	Phases	Switches
101	U-V	SW1, SW4
001	U-W	SW1, SW6
011	V-W	SW3, SW6
010	V-U	SW3, SW2
110	W-U	SW5, SW2
100	W-V	SW5, SW4



Gambar 2. Perubahan Komutasi Motor BLDC

Saat rotor berputar, maka perubahan besar medan magnet antara magnet permanen dan gaya elektromagnetik dari lilitan kawat akan dideteksi oleh sensor hall sebagai masukan *controller* sehingga proses komutasi dapat berjalan secara simultan dan kontinu.

III. Perancangan Sistem dan Realisasi

A. Berikut ini merupakan spesifikasi dari motor BLDC yang akan digunakan dapat dilihat pada tabel 2.

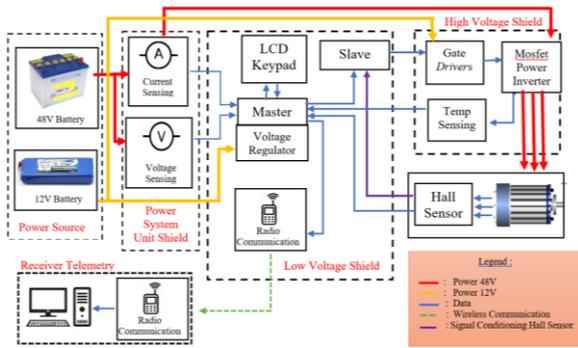
Tabel 2 Spesifikasi Motor BLDC

	Type : Brushless DC
	Rated Voltage : 48V
	Rated Power : 1000W
	Rated efficiency : >83%
	Rated Speed : 530 RPM atau 60Km/h
	Pole pairs : 23
	Max Torque : 40 N.m
	Hall Sensor : 3 hall sensor

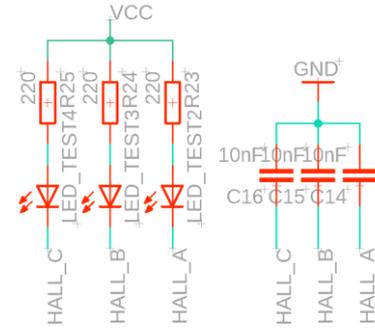
B. Perancangan Sistem

Berikut ini merupakan gambar diagram blok sistem yang akan dibuat dapat dilihat pada gambar 3. Pada penelitian ini terdiri dari dua buah sistem, yaitu sistem *driver motor controller BLDC*, dan sistem yang kedua yaitu *power monitoring system telemetry*. Pada setiap sistem terdiri dari satu mikrokontroler yang berfungsi sebagai pusat pemrosesan data untuk mengontrol setiap masukan dan keluaran. Kedua mikrokontroler ini terhubung satu sama lain (*master-slave*). Hal ini dilakukan secara terpisah agar mikrokontroler dapat bekerja secara maksimal pada setiap sistem.

Pada sistem yang dibuat *power monitoring system* bertindak sebagai *master* dan *driver motor* berfungsi sebagai *slave*. Pengaturan parameter driver motor dilakukan melalui keypad yang terhubung pada *master*; selanjutnya data akan dikomunikasi kepada *slave* melalui I2C untuk menjalankan fungsi *driver motor*. Pada *power monitoring system* terdiri dari beberapa sensor yaitu sensor arus, tegangan, sensor joule motor dan sensor kecepatan putaran motor. Data ini kemudian akan diolah didalam *master* dan dikirim secara *wireless* menggunakan *telemetry* untuk diolah lebih lanjut di dalam komputer. Pada bagian *slave (driver motor controller)* terdiri dari 3 bagian utama yaitu mikrokontroler, MOSFET *gate driver* dan MOSFET *power inverter*.



Gambar 3. Diagram Blok Sistem



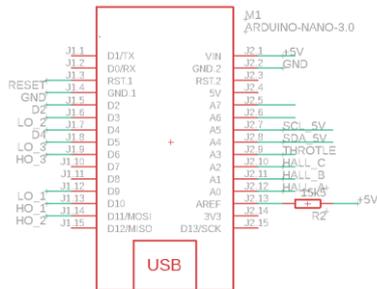
Gambar 6. Digital Input Hall Sensor

C. Perancangan Driver Motor Controller

Pada perancangan driver motor BLDC terdiri dari beberapa komponen penyusun yaitu sebagai berikut.

1. Minimum System Driver Motor Controller

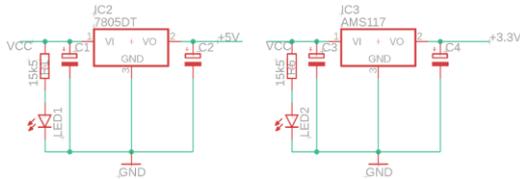
Berikut ini merupakan gambar rangkaian skematik dari sistem minimum driver motor controller dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Sistem Minimum Driver Motor Controller

2. Power Regulator

Pada rangkaian sistem beroperasi pada tegangan 5V, untuk itu agar sistem minimum dapat beroperasi dengan baik diperlukan rangkaian power regulator untuk menurunkan level tegangan dari sumbernya. Berikut ini merupakan gambar rangkaian power regulator dapat dilihat pada gambar 5



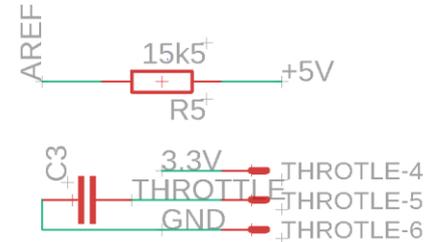
Gambar 5. Rangkaian Power Regulator.

3. Digital Hall Sensor

Agar driver motor dapat berjalan sesuai komutasinya maka diperlukan masukan dari hall sensor. Pada rangkaian ini dapat ditambahkan sebuah kapasitor 10nF untuk memfilter sinyal masukan dari hall sensor. Selain itu untuk memudahkan dalam proses analisa bisa ditambahkan LED indikator yang dihubungkan secara parallel pada setiap masukan hall sensor. Berikut ini merupakan gambar rangkaian dari digital hall sensor dapat dilihat pada gambar 6.

4. Analog Input Throttle

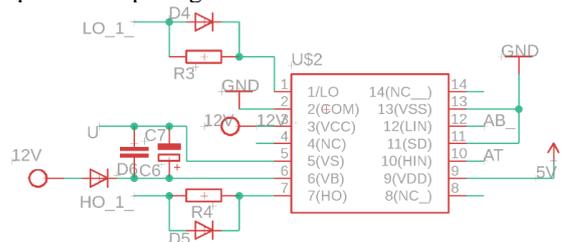
Throttle merupakan sebuah perangkat yang berfungsi sebagai pedal gas pada sebuah prototipe mobil listrik. Berikut ini merupakan gambar rangkaian dari analog input throttle, dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7 Analog Input Throttle Skematik

5. Rangkaian Gate Driver

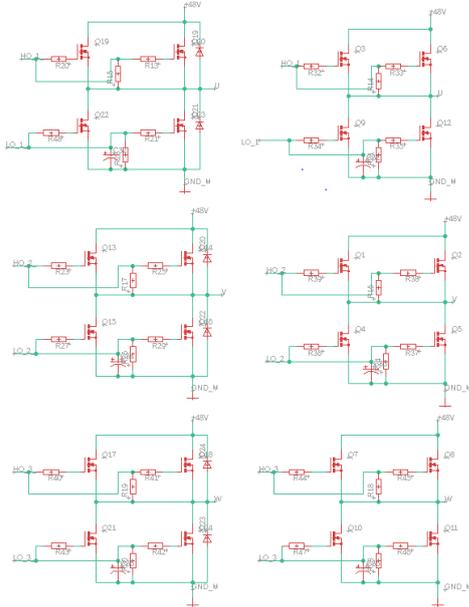
Rangkaian *gate driver* pada driver motor berfungsi sebagai penghubung antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya. Rangkaian ini bekerja dengan cara menguatkan arus sinyal PWM dari mikrokontroler sebelum sinyal tersebut mengenalkan MOSFET. Pada rangkaian gate driver menggunakan IR2110 sebagai gate driver. IR2110 dipilih karena mempunyai kemampuan bekerja pada operasi bootstrap. Pada rangkaian driver motor yang dibuat, menggunakan MOSFET N-Channel pada sisi tinggi. Sehingga diperlukan *floating ground* untuk mengendalikan MOSFET sisi tinggi. Hal ini disebabkan pada kaki source pada MOSFET sisi atas tidak terhubung pada ground sistem Untuk melakuakn hal tersebut IR2110 memerlukan kapasitor *bootstrap* sebagai catu daya floating yang dipasang pada keluaran IR2110 [6]. Berikut merupakan rangkaian skematik dari gate driver pada salah satu fase driver motor controller dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. Rangkaian Skematik Gate Driver IR2110.

6. Rangkaian Power Inverter 3 fase

Rangkaian Power Inverter 3 fase merupakan rangkaian yang berfungsi untuk mengendalikan tegangan supply dari dari baterai sehingga menghasilkan gelombang 3 fase. Berikut ini merupakan gambar rangkaian skematik dari power inverter 3 fase dapat dilihat pada gambar 9.



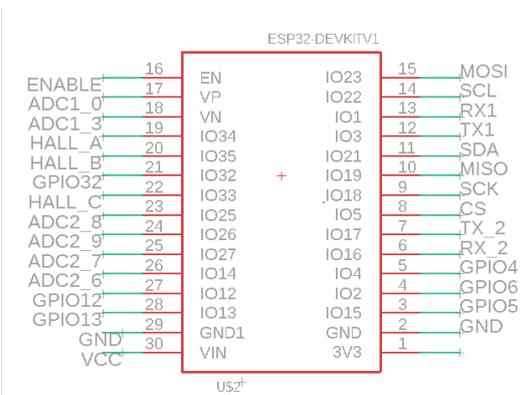
Gambar 9. Rangkaian Power Inverter 3 Fase MOSFET.

D. Perancangan Power Monitoring System Telemetry

Power monitoring system merupakan sebuah sistem yang dibuat untuk dapat memantau beberapa variabel yang ada pada mobil listrik. Variabel-variabel ini berupa tegangan baterai, arus daya dan kecepatan motor. Berikut ini merupakan komponen penyusun power monitoring system yaitu sebagai berikut.

1. Minimum Sistem Power Monitoring System

Berikut ini merupakan gambar rangkaian skematik dari sistem minimum driver motor controller dapat dilihat pada gambar 10.

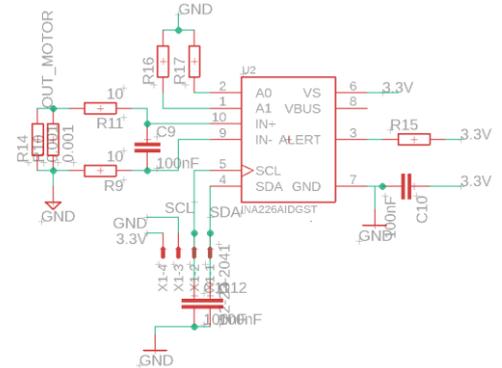


Gambar 10 Rangkaian Skematik Sistem Minimum

Power Monitoring System

2. Sensor Arus INA226

Sensor ini merupakan jenis sensor arus yang bekerja dengan menggunakan Resistor Shunt. INA226 bekerja dengan cara menghitung tegangan drop pada sebuah resistor shunt untuk menghitung nilai arus [5]. Pada penelitian ini nilai resistor shunt yang digunakan yaitu 0.5 mOhm 1W 1%. Berikut ini merupakan gambar skematik dari sensor INA226 dapat dilihat pada gambar 11.



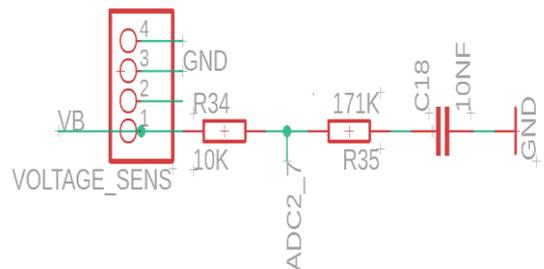
Gambar 12 Rangkaian Skematik INA226

3. Sensor Tegangan

Pada penelitian ini sensor tegangan yang dibuat menggunakan rangkaian *voltage divider*. Jenis mikrokontroler yang digunakan pada penelitian ini memiliki operating voltage antara 0-3.3V, sehingga untuk dapat membaca nilai tegangan antara rentang 0 – 60V diperlukan perhitungan nilai resistor yang akan digunakan sesuai dengan persamaan 1 berikut.

$$Max_adc = Max_VB \times R2 / (R1+R2) \dots\dots(1)$$

Dari rumus diatas maka di dapat hasil perbandingan R1 dan R2 sebesar 1 : 17.181, sehingga nilai resistor yang digunakan pada R1 dan R2 yaitu sebesar 171 KΩ, dan resistor 2 sebesar 10 KΩ. Berikut ini merupakan gambar skematik dari sensor tegangan yang akan digunakan pada penelitian ini.

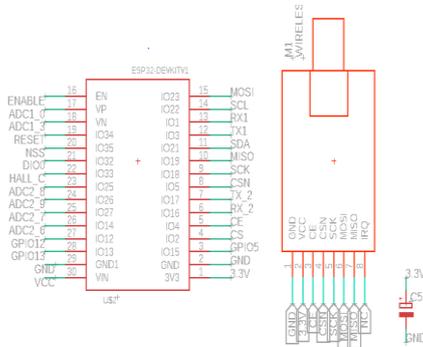


Gambar 12 Rangkaian Skematik Sensor Tegangan.

4. System Telemetry

Pada penelitian ini jenis telemetry yang digunakan menggunakan modul NRF24I01. Modul ini memiliki beberapa kelebihan diantaranya range pengiriman data

0 – 1000 Km., selain itu modul ini memiliki kecepatan pengiriman data yang sangat cepat dalam rentang micro seconds (ms). Berikut ini merupakan gambaran rangkaian skematik dari system telemetry yang digunakan dapat dilihat pada gambar 13.

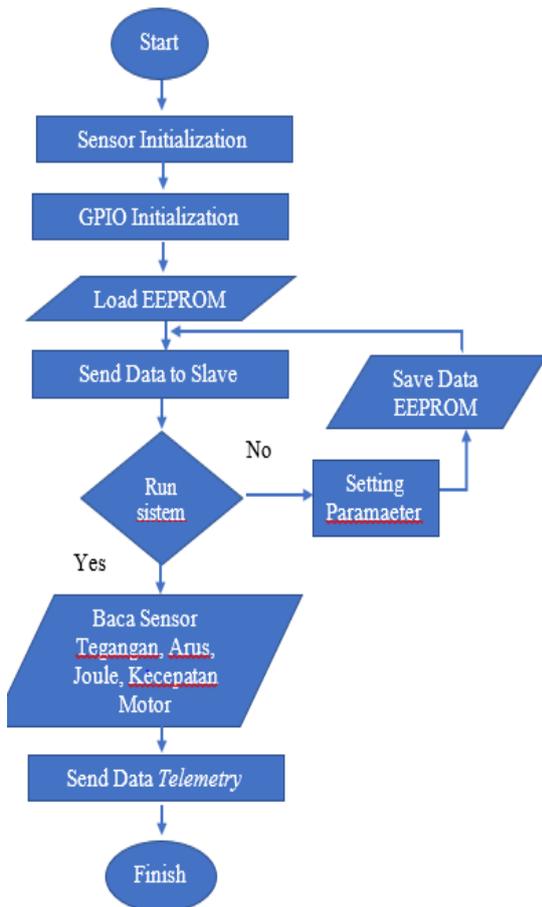


Gambar 13. Rangkaian Skematik System Telemetry

E. Pembuatan Program

1. Pembuatan Program Power Monitoring System (Master).

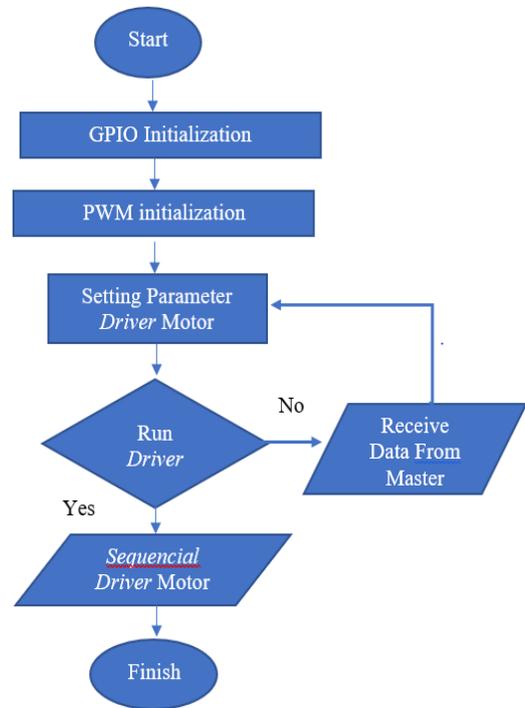
Berikut ini merupakan flowchart dari power monitoring system sebagai master pada sistem dapat dilihat pada gambar 14..



Gambar 14. Flowchart Power Monitoring System (Master).

2. Pembuatan Program Driver Motor Controller (Slave).

Berikut ini merupakan flowchart dari driver motor controller sebagai slave dapat dilihat pada gambar 15



Gambar 15. Flowchart Driver Motor Controller (Slave)

IV. Hasil dan Pembahasan

A. Pengujian Digital Input Hall Sensor vs Digital Output Sinyal.

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa komutasi dari driver motor yang dibuat telah sesuai dengan prinsip kerja dari motor BLDC. Berikut ini merupakan hasil pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat pada tabel 3 dan 4

Tabel 3 Sistem Komutasi Forward Rotation

Step	Input			Output					
	Hall A	Hall B	Hall C	High U	Low U	High V	Low V	High W	Low W
1	1	0	0	0	1	PWM	0	0	0
2	1	1	0	0	1	0	0	PWM	0
3	0	1	0	0	0	0	1	PWM	0
4	0	1	1	PWM	0	0	1	0	0
5	0	0	1	PWM	0	0	0	0	1
6	1	0	1	0	0	PWM	0	0	1

A.

Tabel 4. Sistem Komutasi Reverse Rotation

Step	Input			Output					
	Hall A	Hall B	Hall C	High U	Low U	High V	Low V	High W	Low W
1	1	0	0	PWM	0	0	1	0	0
2	1	0	1	0	0	0	1	PWM	0
3	0	0	1	0	1	0	0	PWM	0
4	0	1	1	0	1	PWM	0	0	0
5	0	1	0	0	0	PWM	0	0	1
6	1	1	0	PWM	0	0	0	0	1

Notes:
1 = High Logic 0 = Low Logic PWM: Pulse Width Modulation Signal

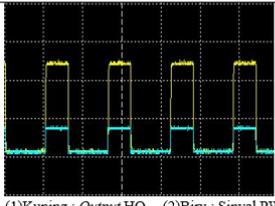
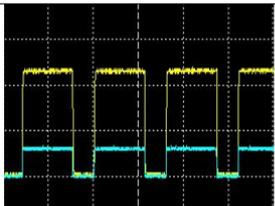
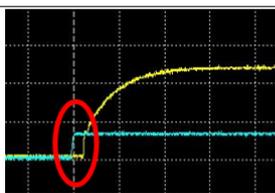
Berdasarkan hasil pengujian respon digital input hall sensor vs digital *output* sinyal pada tabel 2 dan 3 dapat dilihat bahwa perubahan hall sensor terjadi dalam 6 step. Pada saat kondisi putaran *forward rotation* maka urutan perubahan siklus hall sensor yang akan terdeteksi akan berkebalikan dengan urutan pada saat kondisi *reverse fotward*. Begitu pula sebaliknya.

Pada sisi keluaran ketika kondisi diputar secara CW dapat dilihat bahwa nilai logika perubahan sisi MOSFET yang terjadi berubah dari kiri ke kanan berjalan dari fase U-V-W. Sedangkan pada kondisi diputar secara CCW maka nilai logika perubahan sisi MOSFET berubah dari kanan ke kiri dari fase U-W-V. Kemudian dari kedua data diatas dapat dilihat bahwa pada saat kondisi diputar secara CW dan CCW nilai logika yang diberikan pada MOSFET sisi rendah dan tinggi akan berkebalikan sesuai dengan masukan hall sensor yang sama. Sebagai contoh ketika kondisi hall sensor bernilai 1 0 0, maka saat kondisi putaran CW, maka sisi MOSFET yang akan diaktifkan adalah *High V* dan *Low U*, sedangkan pada kondisi diputar secara CCW, maka MOSFET sisi MOSFET yang akan diaktifkan akan berkebalikan yaitu *High U* dan *Low V*. Hal yang sama berlaku pada kondisi masukan hall yang berbeda.

B. Pengujian Output Signal vs Output MOSFET *gate driver*.

1. Pengujian Sinyal PWM pada HIN vs Output HO MOSFET Gate Driver

Tabel 5. Hasil Pengujian Sinyal PWM HIN vs Output HO MOSFET Gate Driver

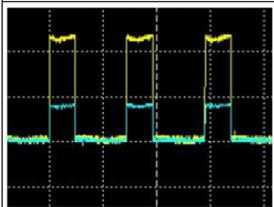
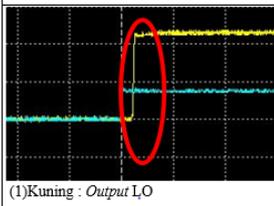
Gambar Gelombang	Variabel Terkontrol	Variabel Terukur
	Volt/div.: 5V Time/div.: 80uS PWM.: 35%	(1)Vavg: 4.2V (2)Vavg: 1.15V (1)Vp: 12V (2)Vp: 3.3V T.: 128uS F.: 7812 Hz
	Volt/div.: 5V Time/div.: 80uS PWM.: 70%	(1)Vavg: 8.4V (2)Vavg: 2.3V (1)Vp: 12V (2)Vp: 3.3V T.: 128uS F.: 7812 Hz
	Volt/div.: 5V Time/div.: 800ns	Time Delay...: 200nS Rise time...: 800nS

Dari hasil pengujian di atas dapat dilihat bahwa Pada data pengujian PWM 35% dan PWM 70% dapat dilihat bahwa hasil gelombang yang dihasilkan memiliki bentuk yang sama. Ketika nilai PWM 35% pada osciloscop terukur nilai Vavg(1) dan Vavg(2) yaitu 4.2V dan 1.15V. Ketika nilai PWM 70% pada osciloscop terukur nilai Vavg(1) dan Vavg(2) yaitu 8.4V dan 2.3V. Hasil ini menunjukkan bahwa hasil keluaran pada IC gate driver HO menghasilkan bentuk gelombang yang sama seperti nilai masukannya.

Saat gelombang mengalami transisi dari kondisi low ke high dan high ke low didapat hasil pengujian bahwa antara gelombang PWM dan output HO mengalami sedikit pergeseran fase sebesar 200nS, serta terdapat proses rising time sebesar 800nS. Ketika sinyal mengalami transisi dari high ke low terdapat nilai delay sebesar 150nS dan fall time sebesar 730nS.

2. Pengujian Sinyal Digital Output pada pin LIN vs Keluaran Sinyal LO (Low Output) pada MOSFET Gate Driver

Tabel 6. Hasil Pengujian Sinyal Digital Output LIN vs Output LO MOSFET Gate Driver

Gambar Gelombang	Variabel Terkontrol	Variabel Terukur
	Volt/div.: 5V Time/div.: 16mS	(1)Vp: 12V (2)Vp: 3.3V
	Volt/div.: 5V Time/div.: 800nS	(1)Vp: 12V (2)Vp: 3.3V Time Delay...: 200nS Rise time...: 23nS
	Volt/div.: 5V Time/div.: 800nS	(1)Vp: 12V (2)Vp: 3.3V Time Delay...: 150nS Fall time...: 22nS

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan dapat analisa bahwa hasil keluaran IC MOSFET *gate driver* pada pin LO (*Low Output*) memiliki bentuk gelombang yang sama dengan nilai masukan yang berasal dari digital *output*. Ketika gelombang mengalami transisi dari kondisi *low* ke *high* dan *high* ke *low* di dapat hasil pengujian bahwa terdapat

pergeseran fase di antara sinyal digital *output* dan *output* LO. Pada saat transisi dari *low* ke *high* terdapat nilai *delay* sebesar 200nS, serta terdapat proses rising time sebesar 22nS. Ketika sinyal terjadi transisi dari *high* ke *low* terdapat nilai *delay* sebesar 150nS dan *fall time* sebesar 23nS.

C. Pengujian Input dan Output Gelombang Driver Motor Controller

Gambar	Spesifikasi Osciloscop	Variabel Terukur
	Volt/Div : 10V/div Time/Div : 4ms/div PWM : 25%	N : 125 P : 50 $T : 4 \times 4.3 = 17.2 \text{ ms}$ $F : 1/0.0172 = 58 \text{ Hz}$
	Volt/Div : 10V/div Time/Div : 4ms/div PWM : 50%	N : 285 P : 50 $T : 4 \times 3.45 : 9.27 \text{ ms}$ $F : 1/0.0092 : 109 \text{ Hz}$
	Volt/Div : 10V/div Time/Div : 4ms/div PWM : 75%	N : 382 P : 50 $T : 4 \times 1.72 : 6.9 \text{ ms}$ $F : 1/0.0069 : 144 \text{ Hz}$

Gambar	Spesifikasi Osciloscop	Variabel Terukur
	Volt/Div : 10V/div Time/Div : 4ms/div PWM : 100%	N : 477 P : 50 $T : 4 \times 1.36 = 5.45 \text{ ms}$ F : $1/0.00545 = 183 \text{ Hz}$

Dari data pengujian di atas, maka dapat dianalisa bahwa bentuk gelombang yang dihasilkan pada *driver* motor yang dibuat berbentuk gelombang kotak (*trapezoidal wave*). Kondisi pada setiap fase akan mengalami perubahan rising dan falling sesuai dengan komutasi dari perubahan hall sensor. Fase U akan mengalami kondisi *High* ketika MOSFET sisi HU (*High Side U*) dipicu oleh PWM, dan akan mengalami kondisi *low* saat digital *output* pada MOSFET sisi LU (*Low Side U*) di picu oleh digital *output*. Hal yang sama terjadi juga pada fase V, dan W. Kemudian dapat dianalisa pula bahwa nilai frekuensi pada setiap gelombang berbanding lurus dengan nilai PWM yang diberikan. Semakin tinggi nilai PWM yang diberikan frekuensi gelombang akan semakin tinggi. Hal ini disebabkan oleh kenaikan kecepatan putaran motor yang semakin meningkat. Ketika kecepatan motor semakin meningkat maka waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya perubahan fase akan semakin meningkat pula.

D. Pengujian Arus, Daya, Kecepatan Motor

1. Pengujian Tanpa Beban

Tabel 7 Pengujian Motor Tanpa Beban

No	Throtle (%)	Nilai PWM	Voltage Batt (V)	Current (A)	Power (W)	Motor Speed (RPM)
1	4%	10	52.6	0.8	42	34
2	8%	20	52.43	0.13	6.8	52
3	17%	40	52.4	0.26	13.6	110
4	33%	80	52.34	0.52	27.2	230
5	50%	120	52.24	0.67	35	320
6	58%	140	52.08	0.73	38	348
7	67%	160	51.89	0.79	40.9	376
8	75%	180	51.86	0.83	43	410
9	83%	200	51.83	0.87	45	443
10	100%	240	51.8	0.99	51.2	533

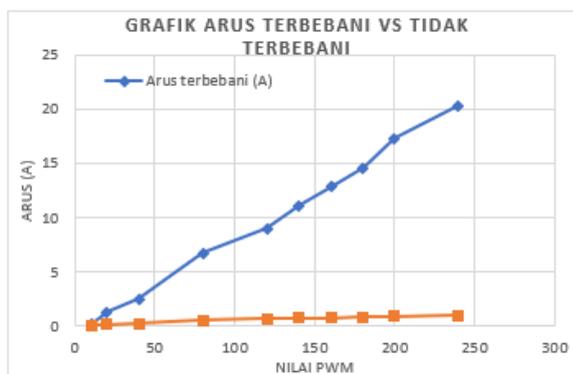
Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan dapat dianalisa bahwa respon arus

terhadap perubahan *throttle* pada kondisi motor BLDC tanpa beban menghasilkan grafik yang cukup linear. Nilai arus yang dibutuhkan oleh motor BLDC semakin meningkat seiring bertambahnya nilai masukan *throttle*. Hal ini disebabkan oleh kenaikan nilai PWM saat nilai masukan *throttle* semakin meningkat. Dengan mengacu pada data tersebut dapat disimpulkan bahwa *driver* motor yang dibuat dapat menjalankan motor BLDC dengan stabil pada kondisi tanpa beban dengan maksimum arus yang dibutuhkan sebesar 0.99A menggunakan voltase baterai 52V.

2. Pengujian dengan Beban

No	Torsi (N.m)	Throttle	Nilai PWM	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Kecepatan (RPM)
1	30	4%	10	50	0.17	8.5	0
2	30	8%	20	49.79	1.28	63.7	0
3	30	17%	40	49.75	3	125.3	45
4	30	33%	80	49.65	6.71	333.1	93
5	30	50%	120	49.605	9.6	446.4	142
6	30	58%	140	49.544	11.11	550.4	164
7	30	67%	160	49.483	12.82	634.7	189
8	30	75%	180	49.422	14.54	718.5	215
9	30	83%	200	49.361	17.25	851.4	241
10	30	100%	240	49.3	20.3	1000.7	310

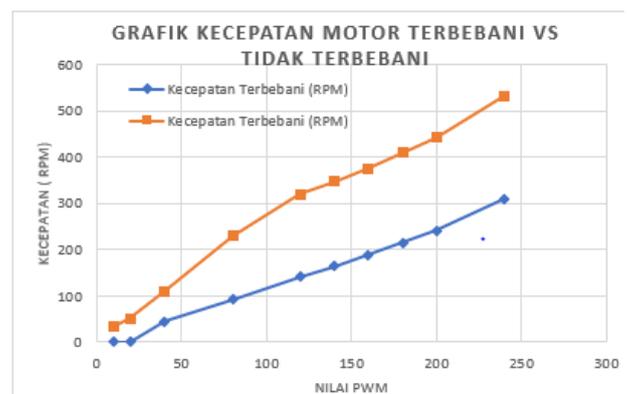
Berdasarkan hasil pengujian di atas dapat dianalisa bahwa nilai arus yang dikonsumsi oleh motor BLDC pada nilai pwm 240 pada kondisi terbebani mengkonsumsi arus sebesar 19.4A dengan nilai daya sebesar 958W. Kecepatan pada kondisi ini terukur sebesar 310 RPM. Sedangkan pada kondisi nilai PWM 0-20 torsi yang dihasilkan oleh motor belum mampu untuk menggerakkan roda pada kondisi terbebani. Dengan mengacu pada data tersebut maka dapat dibuat grafik perbandingan antara kondisi arus, daya dan kecepatan motor pada saat terbebani dan pada saat tidak terbebani. Berikut ini merupakan gambar grafik dari perbandingan tersebut dapat dilihat pada gambar.



Gambar 16. Grafik Perbandingan Arus Motor Terbebani vs Tidak Terbebani

Dengan melihat grafik pada gambar 4.6 di atas maka dapat dianalisa bahwa perbandingan antara arus yang dikonsumsi oleh motor menggunakan *driver* motor

yang dibuat pada kondisi terbebani dan kondisi tidak terbebani terdapat perbedaan yang signifikan. Pada saat kondisi pwm terkecil yaitu 10 nilai arus yang dibutuhkan oleh motor pada kondisi tanpa beban adalah sebesar 0.08A, sedangkan pada kondisi terbebani arus yang dikonsumsi sebesar 0.17A atau sebesar 2.1 kali lebih besar pada saat kondisi tanpa beban. Saat kondisi maksimum pwm 240, nilai arus yang dikonsumsi pada kondisi tanpa beban yaitu sebesar 0.99A, sedangkan pada kondisi terbebani mencapai 20.3A atau 20 kali lebih besar di bandingkan dengan kondisi terbebani. Hal disebabkan ketika kondisi terbebani motor membutuhkan torsi yang lebih besar untuk mencapai nilai kecepatan tertentu, dibandingkan kondisi tanpa beban. Hal inilah yang menyebabkan arus yang dikonsumsi oleh motor menjadi jauh lebih besar ketika kondisi tanpa beban.



Gambar 17. Grafik Perbandingan Kecepatan Motor Terbebani vs Tidak Terbebani

Dengan melihat grafik pada gambar 4.7 di atas maka dapat dianalisa bahwa perbandingan antara kecepatan motor pada kondisi terbebani dan kecepatan motor pada kondisi tanpa beban mengalami penurunan yang cukup besar. Ketika kondisi pwm 0 – 20 motor berputar dengan kecepatan 34 dan 52 RPM, sedangkan pada kondisi terbebani *driver* motor yang dibuat belum mampu menggerakkan motor, hal ini disebabkan arus yang di berikan *driver* motor belum mampu memberikan daya yang cukup untuk melawan torsi beban yang ada pada motor. Pada kondisi pwm maksimum yaitu 240 didapat nilai kecepatan motor tanpa beban yaitu sebesar 533 RPM. Sedangkan pada kondisi terbebani nilai kecepatan motor terukur sebesar 310 RPM atau 0.58 kali lebih kecil dibandingkan kondisi tanpa beban. Hal ini disebabkan oleh adanya hubungan antara torsi dan kecepatan, dimana nilai torsi akan berbanding terbalik dengan kecepatan motor. Sehingga semakin besar nilai torsi beban yang diberikan maka nilai kecepatan motor akan semakin berkurang.

E. Pengujian Power Monitoring System
1. Pengujian Sensor Arus Beban Resistif

Voltage Supply (V)	Beban Resistor (Ohm)	Arus Terukur (A)	Arus Nominal (A)	Error (%)
12.18	42	0.2884	0.29	0.55%
12.18	22	0.5419	0.54	0.35%
12.18	12	1.0123	1.01	0.22%
12.18	6	2.0323	2.03	0.11%
12.18	4	3.0536	3.05	0.11%
12.18	3	4.0628	4.06	0.06%
12.18	2.5	4.8708	4.872	0.02%
12.18	2	6.08	6.09	0.16%

Dari hasil pengujian sensor arus yang dibuat menggunakan beban resistif didapat hasil bahwa nilai pembacaan sensor arus yang dibuat memiliki hasil pembacaan yang sangat baik. Dari 8 sample data yang dilakukan didapat nilai rata-rata kesalahan sebesar 0.19%. Sehingga dapat dikatakan bahwa sensor arus INA226 memiliki tingkat akurasi yang sangat baik apabila digunakan untuk menghitung arus dengan beban resistif

2. Pengujian Sensor Arus Beban Induktif

Voltage (V)	Nilai PWM	Arus Terukur (A)	Arus Nominal (A)	Error (%)
50	10	0,19	0.17	11.7 %
49.79	20	1,42	1.28	10.9 %
49.75	40	2,57	2,52	1.98 %
49.65	60	4,06	3,9	4.1 %
49.605	120	9,8	9,6	2.0 %
49.544	140	11,34	11,11	2.0 %
49.483	160	12,77	12,82	0.3 %
49.422	180	14,37	14,54	1.1 %
49.361	200	17,02	17,25	1.3 %
49.3	240	20,1	20,3	0.9 %

Dari hasil pengujian di atas dapat dianalisa bahwa sensor arus yang dibuat dapat berfungsi untuk mengukur sebuah beban induktif berupa motor BLDC dengan cukup baik. Dari 10 sample data yang diambil di dapat nilai error terbesar berada pada pengukuran arus sebesar 0.17A dengan nilai error sebesar 11,7 %. Nilai kesalahan terkecil berada pada nilai pengukuran arus 12,82 dengan nilai kesalahan sebesar 0,3 %. Dari 10 sample data tersebut dapat dilihat bahwa rata-rata kesalahan pada setiap pengukuran yaitu sebesar 3,68%. Dari hasil analisa tersebut maka dapat dikatakan bahwa sensor arus INA226 memiliki tingkat akurasi yang cukup baik apabila digunakan untuk menghitung arus dengan beban induktif.

3. Pengujian Sensor Tegangan

Tegangan Nominal (V)	Tegangan Terukur (V)	Nilai Kesalahan (%)
11.85	11.55	3%
15.06	15.07	0%
20.05	20.45	2%
24.15	24.21	0%
30.85	30.88	0%
35.51	35.51	0%
40.7	40.7	0%
45.12	45.05	0%
53.06	53.09	0%

Dari hasil pengujian sensor tegangan yang dibuat nilai pengukuran tegangan yang diberikan mengalami nilai kesalahan maksimal sebesar 3%. Dari data pengujian di atas maka dapat dihitung nilai kesalahan rata-rata yaitu sebesar 0.55%. Nilai ini masih dapat ditoleransi disebabkan sensor tegangan yang dibuat menggunakan rangkaian pembagi tegangan. Sehingga nilai pembacaannya sangat bergantung dari nilai toleransi resistor yang digunakan yaitu sebesar 1%.

4. Pengujian Sensor Joule Meter Beban Resistif

Beban Resistor (OHM)	Tegangan (V)	Arus (A)	Waktu (menit)	Pengukuran (Wh)	Nominal (Wh)
2.9	12.05	4.15	1	1	1
2.9	12.05	4.15	2	1	1
2.9	12.05	4.15	4	3	3
2.9	12.05	4.15	8	6	6
2.9	12.05	4.15	12	10	10
2.9	12.05	4.15	16	13	13
2.9	12.05	4.15	20	17	17
2.9	12.05	4.15	24	20	20
2.9	12.05	4.15	28	23	23
2.9	12.05	4.15	30	25	25

Berdasarkan data pengujian di atas dapat dianalisa bahwa hasil pengukuran yang terbaca pada sensor joule meter yang dibuat dengan sensor joule meter yang ada memiliki hasil pembacaan yang sama. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor yang dibuat dapat membaca dengan baik nilai konsumsi energi yang digunakan pada sebuah beban resistif.

5. Pengujian Sensor Joule Meter Beban Induktif

Throtle (%)	Tegangan (V)	Arus (A)	Waktu (menit)	Pengukuran (Wh)	Nominal (Wh)
15%	49.35	2.57	1	2	2
15%	49.30	2.57	2	4	4
15%	49.26	2.57	4	8	8
15%	49.21	2.57	8	16	16
15%	49.15	2.57	12	25	25
15%	49.09	2.57	16	33	33
15%	49.04	2.57	20	42	42
15%	48.99	2.57	24	50	50
15%	48.94	2.57	28	58	58
15%	48.88	2.57	30	63	63

Dengan melihat data hasil pengujian di atas dapat dianalisa bahwa hasil pengukuran sensor joule meter yang dibuat pada kurun waktu tertentu memiliki hasil pengukuran yang sama dengan sensor joule meter yang ada di pasaran. Dari 10 sampel data yang diambil selama 30 menit dapat dilihat bahwa hasil pengukuran dari power monitoring system memiliki hasil pengukuran yang sama dengan alat ukur sensor joule meter yang ada di pasaran. Dari hasil analisa tersebut maka dapat dikatakan bahwa power monitoring system yang dibuat dapat mengukur konsumsi energi dari sebuah beban induktif dengan sangat baik.

6. Pengujian Sensor Kecepatan Motor

No	Tegangan	Throtle	RPM Tacho	RPM alat	Error
1	51.3	5%	25.6	25	2.34%
2	51.3	11%	56	56	0.00%
3	51.3	15%	79.3	80	0.88%
4	51.3	20%	107	107	0.00%
5	51.3	25%	135.3	139	2.73%
6	51.3	36%	190	190	0.00%
7	51.3	48%	258	258	0.00%
8	51.3	67%	357	353	1.12%
9	51.3	88%	470	500	6.38%
10	51.3	100%	533	640	20.08%

Dari hasil pengujian diatas didapat hasil bahwa nilai pembacaan sensor putaran motor yang dibuat memiliki hasil pembacaan yang cukup baik. Dari 10 sample data yang dilakukan didapat nilai rata-rata kesalahan sebesar 1.56%. Pada pengujian kecepatan pada rentang 0 – 353 RPM, hasil pengukuran kecepatan putaran motor memiliki rentang kesalahan dibawah 3%. Ketika kecepatan putaran motor mencapai nilai 533 RPM didapat nilai kesalahan semakin meningkat hingga nilai 20%. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh semakin cepatnya putaran motor, sehingga mikrokontroler yang digunakan tidak dapat menghitung dengan tepat setiap pulsa yang dihasilkan oleh hall effect sensor mengingat mikrokontroler yang digunakan pada *power monitoring system* bekerja untuk mengolah banyak data.

7. Pengujian System Telemetry

Jarak	Jumlah Data	Paket Data diterima	Paket Data tidak berhasil diterima	Interval Pengiriman (ms)	delay send and rec (ms)
10	1000	990	10	56	0.048
20	1000	953	47	56	0.094
40	1000	831	169	56	0.49
60	1000	703	297	56	1.18
80	1000	661	339	56	3.34
100	1000	457	543	56	5.1

Dari hasil pengujian di atas maka dapat dianalisa sistem *telemetry* yang dibuat mampu mengirimkan data dengan waktu interval yang sangat cepat yaitu sebesar 56ms. Nilai ini merupakan waktu interval dari mikrokontroler untuk melakukan satu kali proses looping program. Pada pengujian pengiriman 1000 sampel data dapat dilihat bahwa tingkat keberhasilan pengiriman data membentuk grafik yang linear. Sehingga dapat dikategorikan bahwa tingkat keberhasilan pengiriman data semakin berkurang seiring dengan semakin jauhnya jarak antara *transmitter* dan *receiver*. Pada jarak 10 – 20 meter tingkat keberhasilan pengiriman data mencapai di atas 96%. Pada rentang jarak 40 – 80 meter didapat tingkat keberhasilan pengiriman data berturut-turut adalah 83% , 70% dan 66%. Sedangkan pada jarak terjauh yaitu 100 meter tingkat keberhasilan pengiriman data yang berhasil dikirim yaitu hanya 45%.

Selain itu, dari data di atas dapat dianalisa juga bahwa waktu tunda yang dibutuhkan *receiver* untuk dapat menerima data dari *transmitter* saat melakukan pengiriman data membutuhkan waktu yang sangat singkat. Pada rentang jarak 10 meter waktu tunda yang dibutuhkan *receiver* untuk menerima data adalah sebesar 48uS. Nilai ini semakin meningkat seiring dengan meningkatnya jarak antara *transmitter* dan *receiver*. Pada jarak 100 meter waktu tunda yang dibutuhkan untuk menerima data dari *transmitter* yaitu sebesar 5ms.

V KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai perancangan driver motor controller BLDC pada Electric Vehicle Car 48V dengan Power Monitoring System Berbasis Telemetry maka didapat hasil kesimpulan sebagai berikut.

1. Pada perancangan *Driver Motor Controller* BLDC, sistem yang dibuat dapat digunakan pada motor BLDC 48V 1KW. Bentuk gelombang yang dihasilkan oleh *driver motor controller* adalah gelombang *trapezoidal*. *Driver motor controller* yang dibuat mampu menggerakkan motor BLDC dengan konsumsi arus maksimum pada nilai PWM 240 yaitu sebesar 20.3A dengan daya 1000W dengan kecepatan 310 RPM
2. Pada perancangan *Power Monitoring System*, sistem yang dapat mengukur nilai tegangan, arus, konsumsi energi serta kecepatan dengan baik. Pada pengukuran tegangan pada range tegangan 0- 53 didapat nilai kesalahan dibawah 3%. Pada pengukuran arus, sistem yang dibuat

mampu mengukur nilai konsumsi arus *driver* motor pada range nilai 0-21A dengan kesalahan rata-rata kesalahan sebesar 3.53 %. Pada pengukuran konsumsi energi (joule meter) sistem yang dibuat mampu mengukur nilai konsumsi energi dari *driver* motor pada dengan durasi 30 menit dengan tingkat ketepatan mencapai 95%. Pada pengukuran kecepatan putaran motor, sistem yang dibuat mampu mengukur kecepatan putaran motor pada range 0-530 RPM dengan rata-rata kesalahan sebesar 1.56%.

3. Pada perancangan sistem *telemetry*, sistem yang dibuat dapat berfungsi dengan baik untuk memonitoring beberapa variabel yang terdapat pada prototipe mobil listrik secara *wireless* pada range 0 – 100 meter. Hasil pengujian yang didapatkan bahwa semakin jauh letak antara *transmitter* dan *receiver* maka tingkat keberhasilan pengiriman data akan semakin berkurang.

VI DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Dejan Kos, Milan Curkovi c and Karel ˇ Jezernik, "FPGA Based BLDC Motor Current Control with Spectral Analysis," IEEE © 2006, pp.1217 – 1222
- [2] Ridwan, Muhammad Taufik, "*Rancang Bangun Penggerak Daya Motor Brushless DC 350W/48V*", Program Studi Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, 2012.
- [3] Rajan, A. Albert, R. Daniel Raj, and S. Vasantharathna. "Fuzzy based reconfigurable controller for BLDC motor." *2010 Second International conference on Computing, Communication and Networking Technologies*. IEEE, 2010.
- [4] Andika R. J., Rusdinar Angga, S.T.,M.T., PhD., Wibowo Agung Surya, S.T., M.T., "*Perancangan dan Implementasi Driver Motor Tiga Fasa untuk Pengendali Kecepatan Motor BLDC Berbasis PWM pada Mobil Listrik*", Jurnal e-Proceeding of Engineering Vol.5, No.1, 2018.
- [5] https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Texas-Instruments-TI-INA226AIDGSR_C49851.pdf (diakses 26 September pukul 17.09 WIB)
- [6] https://micro.rohm.com/en/techweb/knowledge/dcdc/dcdc_sr/dcdc_sr01/829 (diakses pada 26 September 2019, pukul 20.28 WIB)