

DESAIN SISTEM KONTROL KECEPATAN MOTOR BLDC BERBASIS PROGRAMMABLE ARRAY LOGIC DENGAN METODE SIX STEP COMMUTATION

(DESIGN SYSTEM SPEED CONTROL BLDC MOTOR BASED PROGRAMMABLE ARRAY LOGIC WITH SIX STEP COMMUTATION METHOD)

Mahadian dewangga, Bambang Sujanarko, Satryo Budi Utomo
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Jember (UNEJ)
Jln. Kalimantan 37, Jember 68121
E-mail: m.dewangga4@gmail.com

Abstrak

Kemajuan teknologi pada sebagian besar peralatan tidak akan lepas dengan penggunaan motor. Terdapat berbagai jenis motor yang ada saat ini, salah satunya adalah motor Brushless Direct Current (BLDC) yang memiliki banyak kelebihan dibanding jenis motor lainnya. Salah satu kelebihan motor brushless DC yaitu menggunakan komutasi elektrik sehingga memiliki efisiensi yang tinggi dan waktu operasi yang lama. Pada penelitian ini akan dibuat Desain Sistem Kontrol Kecepatan Motor Bldc Berbasis *Programmable Array Logic* dengan Metode *Six Step Commutation*. Sehingga nantinya didapat sinyal tegangan tiga fasa berbentuk trapezoid untuk memutar motor. Verifikasi sistem kendali menggunakan aki 12 V, IC PAL sebagai kontrol logika, IC Op-amp sebagai pembangkit gelombang segitiga untuk pengaturan kecepatan, dan motor BLDC 500 W. Dari hasil pengujian tanpa beban, dapat diketahui saat nilai dutycycle PWM maksimum yaitu 100%, didapat kecepatan maksimum sebesar 116,8 rpm. Sedangkan pada pengujian berbeban semakin kecil nilai pada beban, didapat nilai arus yang meningkat dan tegangan yang turun.

Kata Kunci: Motor BLDC, *Programmable Array Logic*, *Six Step Commutation*.

Abstract

Advances in technology in most of the equipment would not be separated with the use of motors. There are various types of motors available today, one of which is a motor Brushless Direct Current (BLDC) which has many advantages over other types of motors. One of the advantages of brushless DC motors that use electric commutation so that it has a high efficiency and a long operating time. In this research will be made Design BLDC Motor Speed Control System Based Programmable Logic Array with Six Step Commutation method. So later obtained a three-phase voltage signal to rotate the motor trapezoidal shape. Verification of control systems using a 12 V battery, IC PAL as control logic, IC op-amp as a triangular wave generator for setting the speed, and the BLDC motor 1 kW. From the test results, it can be seen when the PWM dutycycle maximum value of 100%, obtained a maximum speed of 116.8 rpm.

Keyword: BLDC motor, *Programmable Array Logic*, *Six Step Commutation*.

PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi pada peralatan baik industri maupun rumah tangga tidak akan lepas dengan penggunaan motor. Motor merupakan alat yang dapat berputar jika dialiri dengan listrik. Jenis motor yang sering digunakan adalah motor DC karena mudah dalam pengendalian kecepatan yakni hanya mengatur nilai tegangan atau arus medan saja namun motor DC menggunakan komutator mekanik (sikat) sehingga memiliki keandalan rendah, karena terdapat rugi-rugi sikat dan memerlukan pemeliharaan atau penggantian secara berkala. Kelemahan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan motor *brushless* DC yang menggunakan komutasi elektrik sehingga memiliki efisiensi yang tinggi dan waktu operasi yang lama.

Alat yang digunakan dalam komutasi elektrik sebagai pengganti sikat adalah inverter 3 fasa. Inverter ini digunakan sebagai kontrol kecepatan dari motor BLDC itu sendiri dengan mengatur *dutycycle* atau waktu *switching*

pada masing-masing komponen saklar elektrik seperti *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET), dan *Insulated-Gate Bipolar Transistor* (IGBT). Metode yang umum dan sering digunakan dalam pengendalian inverter motor BLDC yakni dengan menggunakan metode *six-step*. [1]

Metode *six-step* merupakan metode yang sering digunakan dalam pengendalian motor BLDC. Hal ini terjadi karena metode ini mudah diimplementasikan dan memiliki algoritma yang sederhana. Gelombang yang dihasilkan dari metode ini berbentuk *square* atau *trapezoid*.

Agar motor mampu bekerja dengan torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan *timing* perubahan komutasi yang tepat dalam pengendalian BLDC dengan metode *six-step*. Oleh karena itu, pada motor BLDC telah terpasang 3 buah sensor *hall* untuk menentukan *timing* perubahan komutasi pada pengendalian BLDC.

Dari penelitian yang telah ada di bidang kontrol motor BLDC menggunakan rangkaian dengan IC gerbang logika, dimana rangkaian ini membutuhkan komponen dengan jumlah banyak, ukuran rangkaian yang relative besar dan kurang efisien dalam segi ukuran alat. Maka berangkat dari masalah ini, penulis akan membuat kontrol motor BLDC menggunakan rangkaian terintegrasi (IC) menggunakan *array logic*.

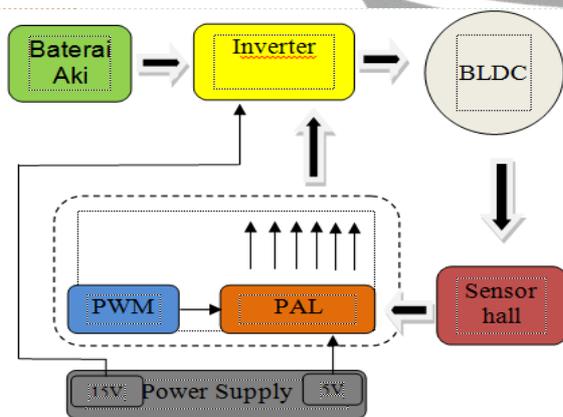
METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini ada beberapa tahapan penelitian yaitu studi literatur, pengerjaan *perangkat* keras, pembuatan *perangkat* lunak, pengujian alat, pengambilan data dan analisa sistem. Berikut ini adalah blok diagram sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 1.

Dari gambar 1, sistem kerja kontrol kecepatan motor BLDC berbasis *Programmable Array Logic* dengan metode *Six Step Commutation*, yaitu sistem utamanya adalah IC PAL, IC ini diprogram dengan fungsi-fungsi gerbang logika. Untuk mengatur kecepatannya yaitu dengan rangkaian pembangkit PWM (*Pulse Width Modulation*) dengan cara merubah tegangan refensi oleh potensio meter, sehingga didapatkan nilai lebar pulsa terhadap satu gelombang penuh.

Untuk menentukan timing yang tepat dibutuhkan sensor hall. Hall sensor merupakan sensor yang digunakan untuk mendeteksi medan magnet. Dalam penggunaannya pada motor BLDC, kapanpun kutub magnetik rotor (*North* atau *South*) mendekati sensor *hall*, maka akan menghasilkan sinyal HIGH atau LOW, yang mana dapat digunakan untuk mendeteksi posisi rotor. Dengan menggunakan tiga sensor *hall* akan didapatkan enam kombinasi yang berbeda. Keenam kombinasi ini menunjukkan timing perubahan komutasi. Ketika dari ketiga sensor *hall* didapatkan kombinasi tertentu, sinyal PWM pada suatu step harus diubah sesuai dengan kombinasi yang didapatkan.

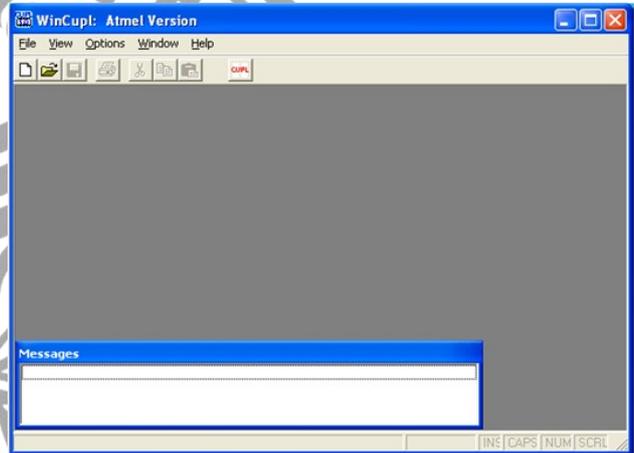
Pada Inverter dirancang menggunakan enam buah mosfet tipe IRF640, output dari inverter ini berupa tegangan 3 fasa



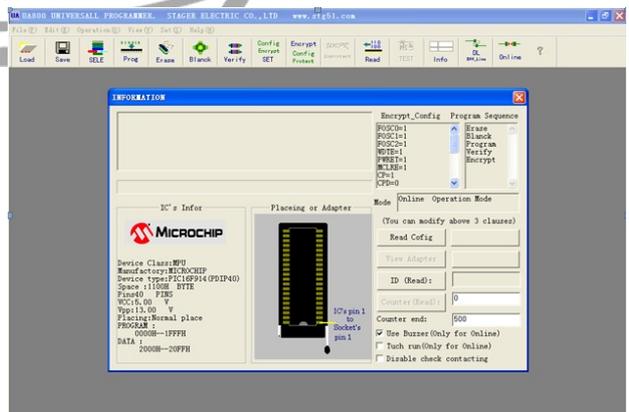
Gambar 1. Blok Diagram Secara Keseluruhan

logika pensaklaran mosfet agar terbentuk sinyal trapezoid sesuai dengan metode yang digunakan yaitu six step commutation.

Gambar 2 adalah *Software* yang dijalankan pada sebuah komputer. Dengan menggunakan *Software* tersebut maka perancangan dapat memasukkan data pada komputer yang berisi tentang fungsi logika yang dikehendaki. Keluaran dari *Software* berupa *fuse map* dan hasil tes data yang dikirimkan pada memory PAL. Tahap awal dimulai dengan penyederhanaan persamaan fungsi logika. Setelah persamaan fungsi logika didapatkan maka dapat dilanjutkan dengan menjalankan *development Software*. Hasil dari *development Software* tersebut merupakan *fuse map* dan data *test* yang digunakan untuk pemrograman PAL. Dalam penelitian ini pemrograman dilakukan menggunakan *Compiler Universal for Programmable Logic* (CUPL). Perancangan rangkaian logika yang sudah didapatkan dari penelitian sebelumnya, kemudian dituliskan pada *Software* CUPL yang kemudian nantinya akan dicocokkan dengan menggunakan simulasi terlebih dahulu. Apabila pada simulasi telah cocok dengan tabel kebenaran, maka dapat dilakukan proses *compile*. Bila proses *compile* berhasil maka akan menghasilkan file jedec



Gambar 2. Aplikasi WinCupl



Gambar 3. Universal programmer G540

(.jed) dan file jedec inilah yang nantinya diprogram pada IC PAL16v8.

yang diberikan untuk kumparan motor sesuai dengan data yang dikirim oleh sistem triggernya. Terdapat enam fungsi

Setelah file program (.jed) telah didapatkan kemudian dilakukan implementasi Software ke hardware, yaitu pada IC ATF16v8. Cara untuk mengimplementasikan hal tersebut yaitu dengan menggunakan Universal Downloader. Universal Downloader ini sangat banyak kegunaannya selain untuk pemrograman PLD, juga untuk memprogram EPROM, EEPROM, MPU, dan lain-lain. Pada penelitian ini menggunakan GENIUS G540 universal programmer. Dapat dilihat pada gambar 3.

HASIL PENELITIAN

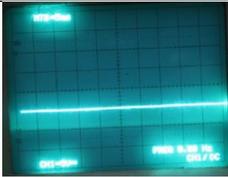
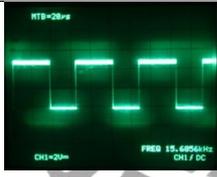
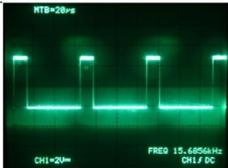
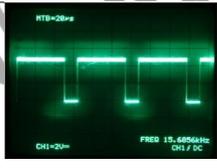
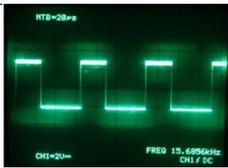
Pada penelitian ini secara garis besar penelitian terdapat beberapa pengujian, yaitu pengujian rangkaian PWM, pengujian rangkaian PAL, pengujian rangkaian driver, pengujian motor tanpa beban, dan pengujian motor berbeban.

Pengujian Rangkaian PWM

Pengujian rangkaian PWM terdiri dari pembangkit gelombang segitiga, pembagi tegangan DC dan sebuah komparator. Pembangkit segitiga diuji dengan mengamati bentuk gelombang menggunakan osiloskop. Berikut hasil dari rangkaian PWM dengan enam nilai dutycycle yang berbeda.

Dari pengamatan tabel 1 dapat diketahui bahwa semakin besar nilai dutycycle, maka t_{on} akan semakin lebar sehingga kecepatan motor akan bertambah Berdasarkan hasil

Tabel 1. Pengujian Rangkaian PWM

| D(%) | Bentuk Sinyal | D(%) | Bentuk sinyal |
|------|---|------|---|
| 0 |  | 60,7 |  |
| 20,4 |  | 80,5 |  |
| 40,4 |  | 100 |  |

pengamatan terhadap bentuk gelombang pada komparator dapat disimpulkan bahwa Rangkaian Pulse Width Modulation telah benar dan sesuai dengan yang diharapkan.

Pengujian Rangkaian PAL16v8

Pada penelitian ini dibutuhkan software dan hardware untuk implementasi ke rangkaian yang sebenarnya.

Pembuatan program rangkaian logika berdasarkan penelitian sebelumnya, dengan menggunakan aplikasi WinCUPL. Aplikasi ini dipilih karena penggunaannya yang lebih mudah dari aplikasi lainnya, seperti Warp, PALSM dan lain-lain. Aplikasi ini menggunakan bahasa C namun lebih sederhana.

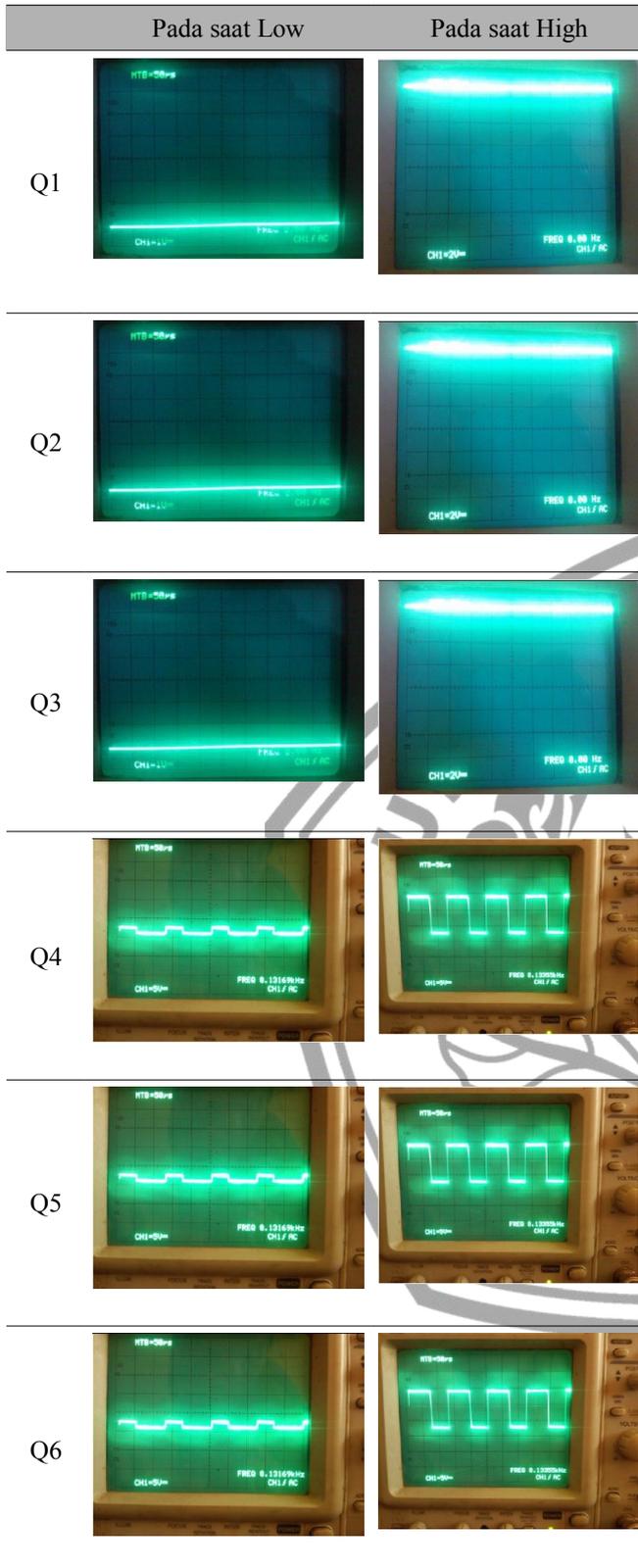
Rangkaian terintegrasi (IC) yang digunakan untuk mengimplementasikan rangkaian gerbang logic yang telah dibuat adalah menggunakan IC PAL16V10 yang telah diprogram. Diperlihatkan bahwa terdapat lima pin masukan yang digunakan yaitu, sensor hall A, sensor hall B, sensor hall C, direction, dan PWM. Sedangkan keluaran yang digunakan sebanyak enam pin, yaitu masing-masing keluaran Q1-Q6. Pada pengujian ini akan dicari hubungan input dan output dari IC tersebut dan besar tegangan pada input dan output pada saat high dan low.

Hasil pengujian input dan output pada IC yang telah diprogram dapat dilihat pada table. Dimana data pengujian harus sama dengan data hasil proses rangkaian digital pada penelitian sebelumnya.[2]

Tabel 2. Pengujian Rangkaian Logic

| D (V) | C (V) | B (V) | A (V) | Q1 (V) | Q2 (V) | Q3 (V) | Q4 (V) | Q5 (V) | Q6 (V) | |
|-------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| C W | 4,4 | 4,4 | 10 mV | 4,4 | 2,7 | 1,3 mV | 1,4 mV | 1,4 mV | 2,7 | 1,4 mV |
| | 4,4 | 4,4 | 10 mV | 10 mV | 1,3 mV | 1,4 mV | 2,7 | 1,4 mV | 2,7 | 1,3 mV |
| | 4,4 | 4,4 | 4,4 | 10 mV | 1,4 mV | 1,4 mV | 2,7 | 2,7 | 1,5 mV | 1,4 mV |
| | 4,4 | 10 mV | 4,4 | 4,4 | 1,4 mV | 2,7 | 1,4 mV | 2,7 | 1,4 mV | 1,4 mV |
| | 4,4 | 10 mV | 4,4 | 4,4 | V | 2,7 | 1,4 mV | 1,4 mV | 1,3 mV | 2,7 |
| | 4,4 | 10 mV | 4,4 | 10 mV | 2,7 | 1,4 mV | 1,4 mV | 1,4 mV | 1,4 mV | 2,7 |
| C C W | 10 mV | 10 mV | 10 mV | 4,4 | 1,4 mV | 1,4 mV | 2,7 | 2,7 | 1,5 mV | 1,3 mV |
| | 10 mV | 10 mV | 4,4 | 4,4 | 1,5 mV | 1,4 mV | 2,7 | 1,4 mV | 2,7 | 1,5 mV |
| | 10 mV | 10 mV | 4,4 | 10 mV | 2,7 | 1,4 mV | 1,4 mV | 1,4 mV | 2,7 | 1,4 mV |
| | 10 mV | 4,4 | 4,4 | 10 mV | 2,7 | 1,4 mV | 1,4 mV | 1,3 mV | 1,4 mV | 2,7 |
| | 10 mV | 4,4 | 10 mV | 10 mV | 1,4 mV | 2,7 | 1,4 mV | 1,4 mV | 1,5 mV | 2,7 |
| | 10 mV | 4,4 | 10 mV | 4,4 | 1,4 mV | 2,7 | 1,4 mV | 2,7 | 1,4 mV | 1,4 mV |

Tabel 3. Pengujian Rangkaian Driver



pengujian dilakukan dengan dengan mengamati bentuk gelombang menggunakan osiloskop.

Berdasarkan tabel 3 diatas dapat dilihat bahwa, gambar yang ditunjukkan pada Q1,Q2, dan Q3 adalah sama. Begitupula pada Q4,Q5,dan Q6 yang memiliki gelombang yang sama.

Pada saat pengambilan data diatas frekuensi dari PWM sebesar 8,172 KHz. Dan pada Q4,Q5,dan Q6 driver yang mendapatkan sinyal PWM juga memiliki frekuensi sebesar 8,133 Khz. Dari data tersebut membuktikan bahwa rangkaian driver ini mampu menjaga agar rangkaian beroperasi pada level parameter yang sesuai.

Dari tabel diatas dapat diketahui bahwa pada saat input lowVIL tegangan sebesar 10,3 sampai 10,4mV sedangkan pada datasheet membutuhkan tegangan VIL sebesar -0,5 sampai 0,8 V agar memberikan logic low(0) dan pada saat high VIH tegangan sebesar 4,41-4,42Volt, ini dikarenakan pada pin input diberi resistor pullup untuk menghindari kondisi tegangan ambang, sedangkan pada datasheet membutuhkan tengangan VIH sebesar 2.0 sampai VCC + 0,75 atau $4.42+0,75=5,17V$ agar mampu memberikan logic high. Kemudian pada pin output , VOL sebesar 1,3 sampai 1.5 mV pada saat low dan VOH sebesar 2,796V pada saat high. Dan nilai VOL pada datasheet maksimum 0,5V dan VOH minimal 2.4V Sehingga hanya akan didapat logika low dan high pada masing-masing input dan output. Dari hasil penujian diatas didapat data high(1) dan low(0) yang sesuai dengan rangkaian *logic* yang telah dibuat sebelumnya.

Pengujian Kecepatan Motor Tanpa Beban

Pada pengujian ini akan dicari hubungan nilai PWM terhadap kecepatan motor. Sehingga nantinya dapat diketahui karakteristik motor yang dipakai yakni berupa linier atau tidaknya perubahan PWM terhadap kecepatan motor dan batas kecepatan maksimumnya.

Dari hasil pengujian maka didapatkan beberapa data akibat dari perubahan PWM atau *Dutycycle* yang diperlihatkan pada tabel, sedangkan grafik hubungan antara PWM (*dutycycle*) terhadap speed ditunjukkan pada tabel.

Tabel 4 Dari gambar dapat dilihat bahwa semakin besar nilai PWM (*dutycycle*) yang diberikan maka semakin cepat putaran motor atau dengan kata lain nilai PWM (*dutycycle*) berbanding lurus dengan kecepatan motor. Dan didapat kecepatan maksimumnya saat tegangan input 12,5 volt sebesar 116,8 rpm. Alasan bagaimana PWM dapat mengatur kecepatan motor adalah mengatur berapa persen tegangan input yang dialirkan ke motor yakni dengan mengatur lama waktu saat sinyal high terhadap periode PWM itu sendiri.

Selain itu, dapat dilihat pada osiloskop yaitu sinyal dari salah satu fasa motor dimana metode *Six Step* menciptakan gelombang AC yang berbentuk *trapezoid* atau *square* karena PWM yang digunakan dalam metode ini merupakan PWM *square*. Akibat dari gelombang yang berbentuk *square* atau *trapezoid* timbul gelombang harmonik. Gelombang harmonik inilah yang menyebabkan motor “bising” ketika berputar. Gelombang harmonik tersebut sangat jelas terlihat pada saat motor berputar pelan atau saat frekuensi rendah yang dibuktikan dengan bentuk gelombang *trapezoid* tidak beraturan dan belum sempurna. Namun, saat motor berputar cepat atau saat frekuensi bertambah besar tepatnya saat PWM 80-100%, bentuk gelombang *trapezoid* telah

Pengujian Rangkaian Driver

Permasalahan pada implementasi rangkaian kendali *logic* ini adalah sama dengan rangkaian kendali elektronik pada umumnya yaitu menjaga agar rangkaian beroperasi pada level parameter yang sesuai. Pengujian rangkaian driver ini dilakukan untuk memastikan bahwa rangkaian driver memiliki respon frekuensi yang sesuai. Dengan demikian

sempurna atau menyerupai sinyal sinusoidal sehingga suara motor menjadi lebih mulus.

Tabel 4. Pengujian pada Fasa Motor

| Dutycycle (%) | Speed (rpm) | Bentuk sinyal pada fasa motor |
|---------------|-------------|-------------------------------|
| 20,44 | 32,1 | |
| 40,4 | 62 | |
| 60,78 | 89,4 | |
| 80,42 | 116,2 | |
| 100 | 116,8 | |

*) tegangan baterai saat pengujian ini adalah 12,5 Volt

Pengujian Kecepatan Motor Berbeban

Pengujian berbeban adalah sistem sudah terpasang beban dari awal saat motor belum dijalankan. Yaitu dengan menghubungkan motor BLDC dengan generator DC yang

kemudian generator tersebut dibebankan pada resistor. Beban yang digunakan adalah empat buah resistor keramik 5 watt dengan masing-masing sebesar 1,88 Ω; 1,41 Ω; 0,94 Ω dan 0,47 Ω. Penulis hanya mengambil tiga buah sampel kecepatan saja yakni pada *dutycycle* 30%, 60%, 90% dengan beban berbeda-beda.

Berikut menampilkan tabel dengan mengambil tiga buah sampel *dutycycle*. Berdasarkan Tabel 4.5 diatas terdapat empat data dengan nilai beban berbeda dengan kecepatan awal sebesar 78,9rpm, dimana semakin besar nilai beban, maka semakin besar pula nilai tegangan pada fasa motor dan berbanding terbalik dengan nilai arus pada fasa motor yang semakin menurun. Sebagai contoh pada beban 0,47Ω nilai tegangan sebesar 5,2 Vac dan nilai Arus 3,01 A.

Tabel 5. Pengujian motor berbeban pada *dutycycle* 30%

| Speed (rpm) | Beban (Ω) | Tegangan Fasa (Vac) | Arus fasa (I) |
|-------------|-----------|---------------------|---------------|
| 78,9 | - | 6,49 | 0,92 |
| 53,9 | 0,47 | 5,2 | 3,01 |
| 56,3 | 0,49 | 5,32 | 2,92 |
| 60 | 1,41 | 5,44 | 2,75 |
| 62,4 | 1,88 | 5,53 | 2,25 |

Tabel 6. Pengujian motor berbeban pada *dutycycle* 60%

| Speed (rpm) | Beban (Ω) | Tegangan Fasa (Vac) | Arus fasa (I) |
|-------------|-----------|---------------------|---------------|
| 101,2 | - | 7,16 | 0,94 |
| 65,7 | 0,47 | 5,9 | 3,68 |
| 71,4 | 0,49 | 6,19 | 3,22 |
| 74,7 | 1,41 | 6,41 | 3,03 |
| 76,5 | 1,88 | 6,59 | 2,8 |

Tabel 7. Pengujian motor berbeban pada *dutycycle* 90%

| Speed (rpm) | Beban (Ω) | Tegangan Fasa (Vac) | Arus fasa (I) |
|-------------|-----------|---------------------|---------------|
| 112,5 | - | 8,54 | 0,95 |
| 71,7 | 0,47 | 6,27 | 4,23 |
| 78,1 | 0,49 | 6,63 | 3,78 |
| 83,4 | 1,41 | 6,91 | 3,45 |
| 86,8 | 1,88 | 7,18 | 3,18 |

Sedangkan pada beban 1,88Ω nilai tegangan naik menjadi 5,53 Vac dan nilai Arus turun menjadi 2,55 A. Hal tersebut terjadi dikarenakan pada saat generator diberi beban kecil maka akan membutuhkan motor dengan torsi yang sangat besar, sehingga kecepatan motor akan menurun, dapat dilihat pada tabel, nilai kecepatan terendah terjadi pada nilai beban

yang paling kecil. Pada saat terjadi kenaikan torsi maka arus akan semakin besar pula.

Hal yang serupa juga terjadi pada tabel 4.6 dan tabel 4.7 hanya saja nilai kecepatan, tegangan, dan arus memiliki nilai yang lebih besar. Ini dikarenakan nilai kecepatan awal yang lebih besar, yaitu sebesar 101,2 rpm dan 112,5 rpm.

Dari data tabel diatas dapat dilihat bahwa arus tertinggi yaitu sebesar 4,23 A terjadi pada *dutycycle* 90% dengan beban paling kecil 0,47 Ω . Sedangkan nilai Arus terendah sebesar 2,55 A terjadi pada *dutycycle* 30% dengan beban paling besar yaitu 1,88 Ω .

KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan dari penelitian dengan judul “DESAIN SISTEM KONTROL KECEPATAN MOTOR BLDC BERBASIS PROGRAMMABLE ARRAY LOGIC DENGAN METODE SIX STEP COMMUTATION” maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut. Untuk memprogram IC *Programmable Array Logic* menggunakan aplikasi WinCUPL yang paling mudah dalam pengoperasiannya; dengan tegangan rendah, sebesar 2,5 volt atau 50% dari tegangan Vcc, IC ini masih dapat bekerja; pada kaki input, Tegangan input pada saat low V_{IL} sebesar 10,3 sampai 10,4 mV, sedangkan nilai high V_{IH} tegangan sebesar 4,41-4,42Volt; pada kaki output, tegangan output pada saat low V_{OL} sebesar 1,3 sampai 1.5 mV, dan pada saat high V_{OH} sebesar 2,796V; perbandingan dengan menggunakan IC gerbang logika, maka penggunaan IC PAL ini sangat efisien dari segi fisiknya.

Daftar Pustaka

- [1] Ali, Asif. Control Of Blde Motor With The Help Of Pulse Width Modulation.
- [2] Sovan, Bayu. 2014. *Rancang Bangun Sistem Pengendali Motor Brushless Dc Untuk Aplikasi Pada Mobil Listrik*. Universitas Jember.