

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pendahuluan

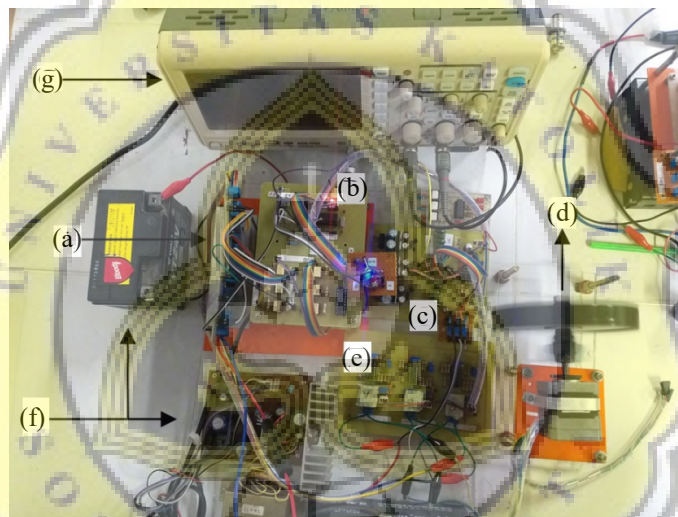
Pada bab ini dijelaskan tentang hasil implementasi kendali tanpa sensor pada motor BLDC. Pengukuran gelombang hasil implementasi dilakukan dengan menggunakan osiloskop digital. Pengukuran gelombang dilakukan pada setiap modul yang terpasang. Modul yang terpasang adalah *system minimum* dari mikrokontroler tipe dsPIC30F012, *driver* MOSFET TLP250, BEMF *detector*, *Low Pass Filter*, *Zero Crossing Detector*, dan *Inverter* tiga fasa. Pengamatan arus fasa dilakukan dengan memasang sensor arus LEM HX 10-P pada tiap-tiap fasanya.

Hasil pengukuran yang dibahas pada bab ini adalah gelombang keluaran dari setiap modul dan nilai kecepatan motor BLDC. Pengukuran dilakukan untuk membuktikan bahwa hasil percobaan telah sesuai dengan teori dan sesuai dengan rancangan pada bab II dan bab III.

4.2. Hasil Pengujian Alat

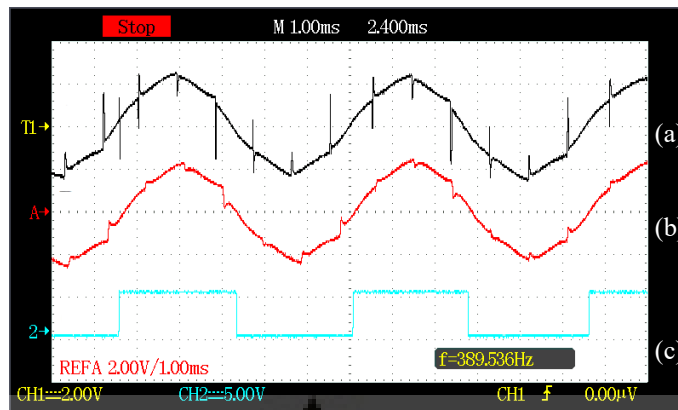
Prototipe tugas akhir dapat di lihat seperti Gambar-4.1, modul elektronika yang digunakan adalah *inverter* tiga fasa (Gambar-4.1a), *system minimum* dsPIC30F4012 dan *driver* MOSFET (Gambar-4.1b), *Low Pass Filter* dan *Zero Crossing Detector* (Gambar-4.1c), motor BLDC (Gambar-4.1d), sensor arus (Gambar-4.1e), sumber tegangan (Gambar-4.1f), dan osiloskop (Gambar-4.1g).

Pengujian dilakukan dengan sumber tegangan 12 Volt DC, 15 Volt DC, dan 24 Volt DC. Nilai tegangan ini diambil dari tegangan kerja maksimal dari motor BLDC yaitu 24 Volt DC. *Inverter* tiga fasa yang terpasang memiliki enam saklar aktif MOSFET. MOSFET yang digunakan memiliki tipe IRFP250 yang memiliki batasan tegangan maksimal sebesar 200 Volt DC. Fasilitas sensor *Hall Effect* pada motor BLDC tipe 42BLF01 tidak digunakan saat pengujian karena kendali yang diterapkan adalah kendali tanpa sensor.



Gambar-4.1. Prototipe keseluruhan alat tugas akhir

Pengujian awal dilakukan dengan mengamati serangkaian gelombang yang menjadi referensi sudut komutasi stator. Gelombang yang diamati meliputi BEMF sebelum melalui *Low Pass Filter*, BEMF setelah melalui *Low Pass Filter*, dan BEMF setelah melewati *Zero Crossing Detector*. Serangkaian gelombang ini berfungsi sebagai data referensi yang kemudian diolah oleh Mikrokontroler dsPIC30F4012 sehingga mendapatkan pola komutasi yang dibutuhkan. Serangkaian gelombang yang dimaksud dapat di lihat pada Gambar-4.2.



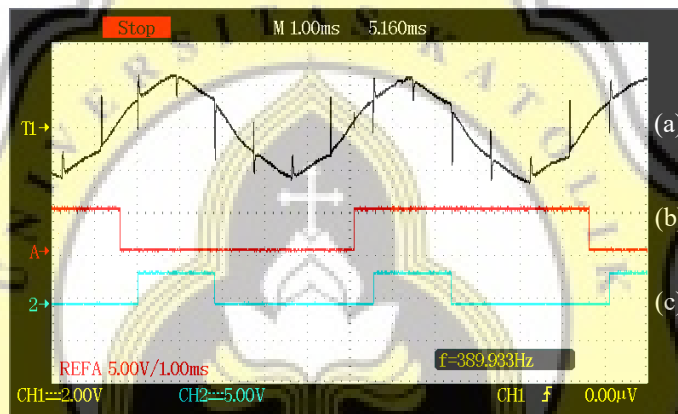
Gambar-4.2. (a) BEMF sebelum LPF (b) BEMF setelah LPF (c) BEMF setelah ZCD

Gelombang BEMF dari salah satu fasa pada motor BLDC dengan tegangan 12 Volt DC (Gambar-4.2a). Gelombang yang dihasilkan berbentuk trapezoidal namun masih mengandung riak tegangan, sehingga perlu adanya rangkaian *filter* tegangan untuk menghilangkannya. BEMF yang telah di *filter* oleh *Low Pass Filter* (Gambar-4.2b) kemudian masuk ke rangkaian *Zero Crossing Detector* (ZCD). Gelombang yang dihasilkan oleh ZCD (Gambar-4.2c) berbentuk sinyal digital. Keluaran dari ZCD berbentuk sinyal digital yang siap diolah di dalam mikrokontroler dsPIC30F4012.

Satu perioda BEMF merepresentasikan 360 derajat elektrik. Satu putaran mekanik menghasilkan empat kali putaran elektrik, karena konstruksi stator dan rotor yaitu enam dan delapan kutub. Setelah sinyal referensi siap diolah oleh mikrokontroler, maka langkah pengujian selanjutnya adalah mengukur keluaran dari enam buah *port* keluaran Mikrokontroler. Setiap kaki *port* mengendalikan satu buah saklar statis MOSFET IRFP250 yang tersusun dalam *Inverter* tiga fasa. Enam keluaran dari Mikrokontroler harus merepresentasikan sudut komutasi yang dibutuhkan motor BLDC agar dapat beroperasi dengan maksimal. Untuk

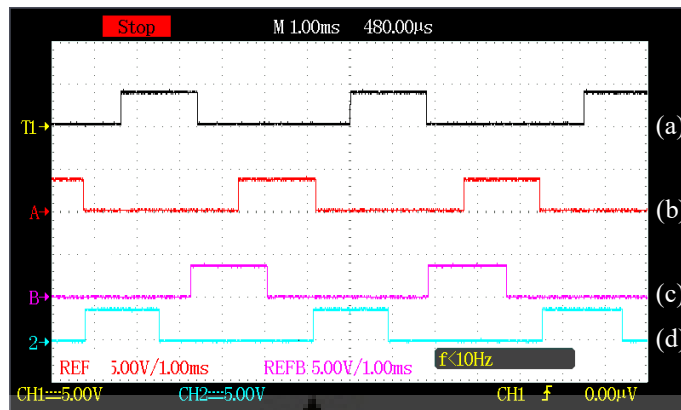
mengamati apakah BEMF sudah di baca dengan baik oleh Mikrokontroler, maka penulis mengeluarkan gelombang hasil olahan *interrupt input capture* ke salah satu *port* pada dsPIC30F4012 selain dari *port* yang tersambung ke *Inverter* tiga fasa.

Satu perioda gelombang *interrupt input capture* merepresentasikan 720 derajat elektrik, maka setengah siklus dari gelombang ini adalah 360 derajat elektrik. Untuk lebih jelasnya dapat di lihat pada Gambar-4.3.

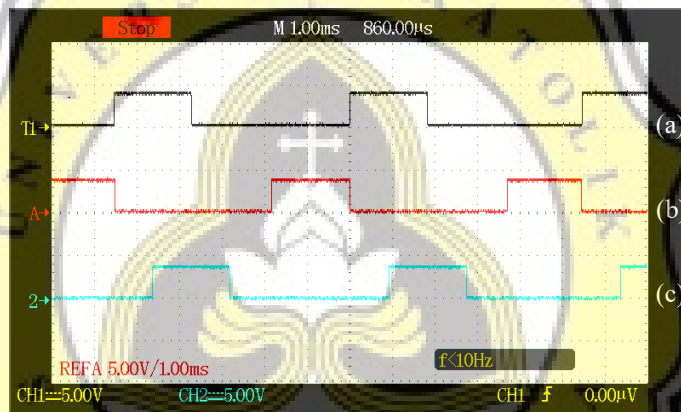


Gambar-4.3. (a) BEMF sebelum LPF (b) *interrupt input capture* yang satu periodanya menggambarkan 0 – 720 derajat elektrik (c) komutasi pada 30 – 150 derajat elektrik. (probe x1, skala 1.00ms/div, CH1 2V/div, RefA 5V/div, CH2 5V/div)

Gelombang *interrupt input capture* diambil dari salah satu *port* yang telah di atur untuk mengeluarkan gelombang tersebut. Gelombang *interrupt input capture* merepresentasikan 0 – 720 derajat elektrik dari BEMF (Gambar-4.3b). Gelombang sinyal komutasi pada saklar MOSFET S_1 yaitu pada sudut 30 – 150 derajat elektrik (Gambar-4.3c), susunan saklar MOSFET pada *Inverter* tiga fasa dapat di lihat pada Gambar-3.8. Komutasi pada saklar yang lain dapat di lihat pada Gambar-4.4. dan Gambar-4.5.



Gambar-4.4. (a) Komutasi S_1 pada 30 – 150 derajat elektrik (b) S_2 pada 210 – 330 derajat elektrik (c) S_3 pada 150 – 270 derajat elektrik (d) S_4 pada 330 – 90 derajat elektrik. (probe x1, skala 1.00ms/div, CH1 5V/div, RefA 5V/div, CH2 5V/div)



Gambar-4.5. (a) Komutasi S_1 pada 30 – 150 derajat elektrik (b) Komutasi S_5 pada 270 – 30 derajat elektrik (c) Komutasi S_6 pada 90 – 210 derajat elektrik. (probe x1, skala 1.00ms/div, CH1 5V/div, RefA 5V/div, CH2 5V/div)

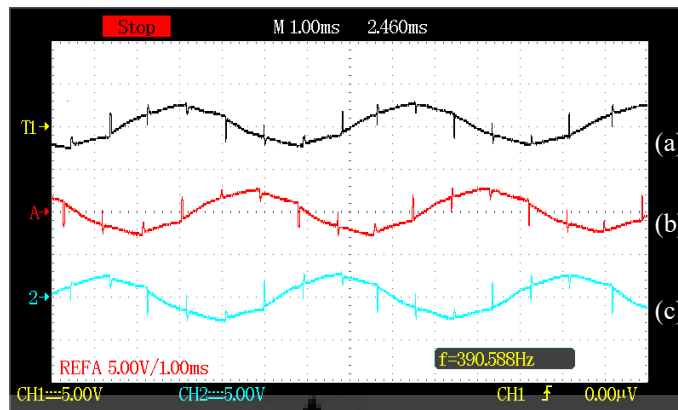
Gelombang komutasi yang keluar dari enam port dsPIC30F4012 mendapatkan referensi dari BEMF. BEMF diolah oleh *input capture* kemudian diubah ke dalam bentuk integer. Setelah menjadi integer di dalam dsPIC30F4012 dilakukan proses perhitungan yang kemudian menghasilkan sudut-sudut komutasi sesuai dengan Gambar-3.10. yang diharapkan.

Semakin tinggi kecepatan BEMF, semakin cepat pula frekuensi dari sudut komutasi yang dihasilkan. S_1 terjadi pada 30° – 150° elektrik, komutasi S_2 terjadi pada 210° – 330° elektrik, komutasi S_3 terjadi pada 150° – 270° elektrik, komutasi

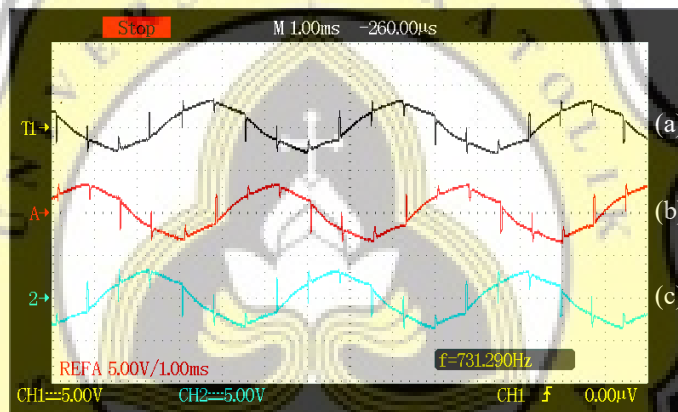
S_4 terjadi pada $330^\circ - 90^\circ$ elektrik (terjadi *overflow* pada komutasi sehingga bisa juga disebut $330^\circ - 450^\circ$ elektrik), komutasi S_5 terjadi pada $270^\circ - 30^\circ$ elektrik (terjadi *overflow* pada komutasi sehingga bisa juga disebut $270^\circ - 390^\circ$ elektrik), dan komutasi S_6 terjadi pada $90^\circ - 210^\circ$ elektrik. Motor BLDC dapat beroperasi dengan efektif dengan pola komutasi yang dihasilkan.

Tiap fasa dari stator motor BLDC membutuhkan satu pasang sinyal kendali. Setiap pasang sinyal memiliki jarak 120 derajat elektrik dari fasa yang lain. Hasil gelombang yang dihasilkan oleh pola komutasi ini dapat di lihat pada Gambar-4.6. hingga Gambar-4.11. Pengukuran gelombang tegangan dilakukan dengan memasang rangkaian pembagi tegangan dari rangkaian detektor BEMF, LPF untuk mengurangi riak tegangan, tiga buah sensor arus tipe LEM HX 10-P untuk pengukuran arus, dan digital *tachometer* untuk pengukuran kecepatan.

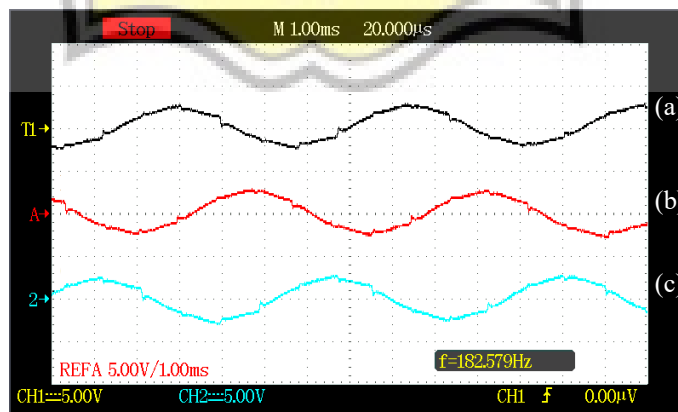
Pengukuran gelombang tegangan BEMF tiga fasa sebelum LPF dengan masukan tegangan 12 Volt DC dapat di lihat pada Gambar-4.6. Gelombang tegangan BEMF tiga fasa sebelum LPF dengan masukan tegangan 15 Volt DC dapat di lihat pada Gambar-4.7. Gelombang tegangan BEMF tiga fasa setelah LPF dengan masukan tegangan 12 Volt DC dapat di lihat pada Gambar-4.8. Gelombang tegangan BEMF tiga fasa setelah LPF dengan masukan tegangan 15 Volt DC dapat di lihat pada Gambar-4.9.



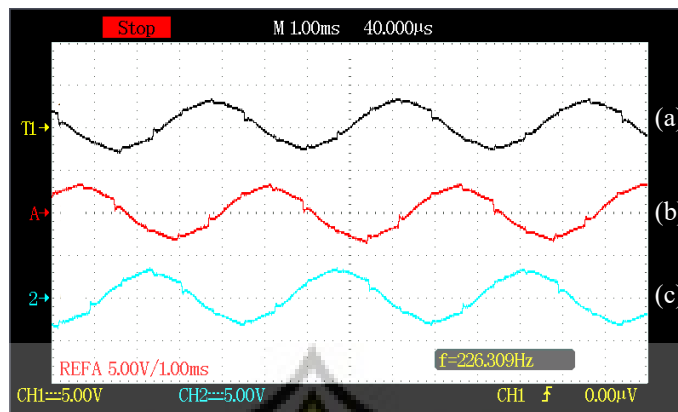
Gambar-4.6. (a) Gelombang BEMF fasa-A sebelum LPF input 12 Volt DC (b) Gelombang BEMF fasa-B sebelum LPF input 12 Volt DC (c) Gelombang BEMF fasa-C sebelum LPF input 12 Volt DC. (probe x1, skala 1.00ms/div, CH1 5V/div, RefA 5V/div, CH2 5V/div)



Gambar-4.7. (a) Gelombang BEMF fasa-A sebelum LPF input 15 Volt DC (b) Gelombang BEMF fasa-B sebelum LPF input 15 Volt DC (c) Gelombang BEMF fasa-C sebelum LPF input 15 Volt DC. (probe x1, skala 1.00ms/div, CH1 5V/div, RefA 5V/div, CH2 5V/div)



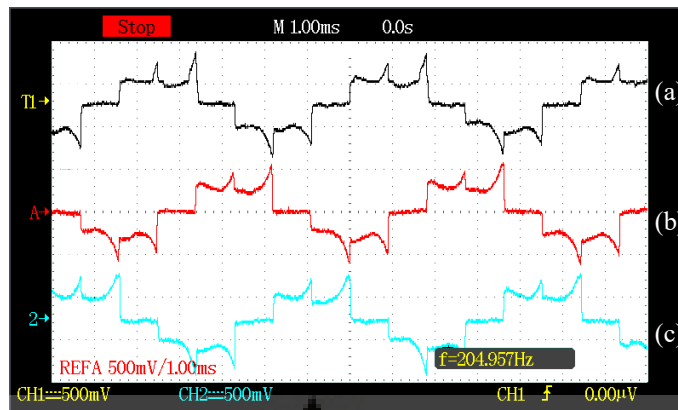
Gambar-4.8. (a) Gelombang BEMF fasa-A setelah LPF input 12 Volt DC (b) Gelombang BEMF fasa-B setelah LPF input 12 Volt DC (c) Gelombang BEMF fasa-C setelah LPF input 12 Volt DC. (probe x1, skala 1.00ms/div, CH1 5V/div, RefA 5V/div, CH2 5V/div)



Gambar-4.9. (a) Gelombang BEMF fasa-A setelah LPF input 15 Volt DC (b) Gelombang BEMF fasa-B setelah LPF input 15 Volt DC (c) Gelombang BEMF fasa-C setelah LPF input 15 Volt DC. (probe x1, skala 1.00ms/div, CH1 5V/div, RefA 5V/div, CH2 5V/div)

Pengukuran gelombang arus tiga fasa dengan masukan tegangan 12 Volt DC dapat di lihat pada Gambar-4.10. kecepatan yang dihasilkan adalah 2756 RPM. Gelombang arus tiga fasa dengan masukan tegangan 15 Volt DC dapat di lihat pada Gambar-4.12. kecepatan yang dihasilkan adalah 3416 RPM. Gelombang arus tiga fasa dengan masukan tegangan 24 Volt DC dapat di lihat pada Gambar-4.14. Kecepatan yang dihasilkan adalah 5484 RPM.

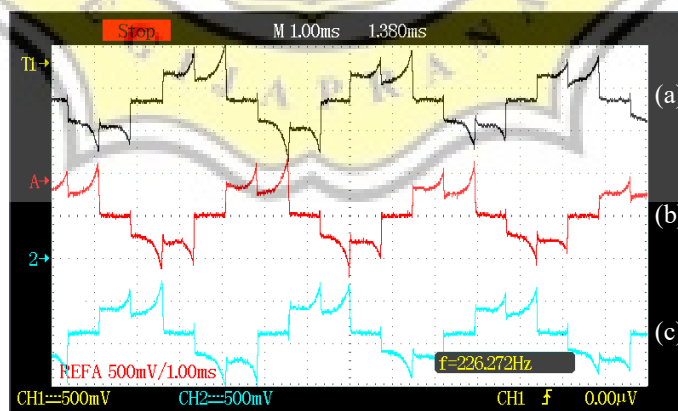
Kecepatan yang dihasilkan dengan sumber 12 Volt DC diukur menggunakan tachometer seperti pada Gambar-4.11. Kecepatan yang dihasilkan dengan sumber 15 Volt DC diukur menggunakan tachometer seperti pada Gambar-4.13. Kecepatan yang dihasilkan dengan sumber 24 Volt DC diukur menggunakan tachometer seperti pada Gambar-4.15. Semakin tinggi tegangan masukan ke konverter maka semakin tinggi kecepatan yang dihasilkan oleh motor BLDC yang menggunakan kendali tanpa sensor.



Gambar-4.10. (a) Gelombang arus fasa-A input 12 Volt DC (b) Gelombang arus fasa-B input 12 Volt DC (c) Gelombang arus fasa-C input 12 Volt DC. (probe x1, skala 1.00ms/div, CH1 500mV/div, RefA 500mV/div, CH2 500mV/div)



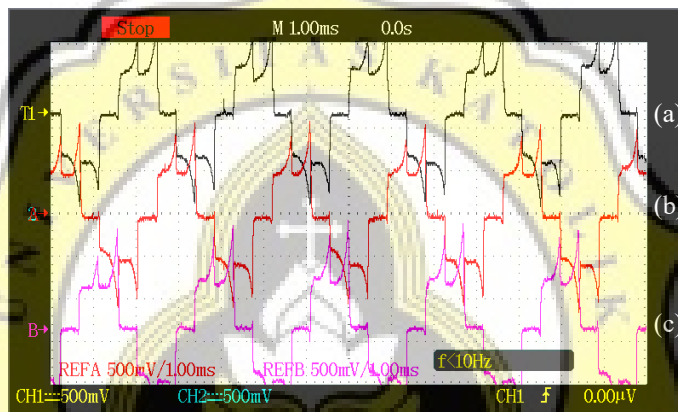
Gambar-4.11. Hasil Pengukuran Kecepatan menggunakan Tachometer Digital yang menunjukkan hasil kecepatan 2756 RPM.



Gambar-4.12. (a) Gelombang arus fasa-A input 15 Volt DC (b) Gelombang arus fasa-B input 15 Volt DC (c) Gelombang arus fasa-C input 15 Volt DC. (probe x1, skala 1.00ms/div, CH1 500mV/div, RefA 500mV/div, CH2 500mV/div)



Gambar-4.13. Hasil Pengukuran Kecepatan menunjukkan hasil kecepatan 3416 RPM.

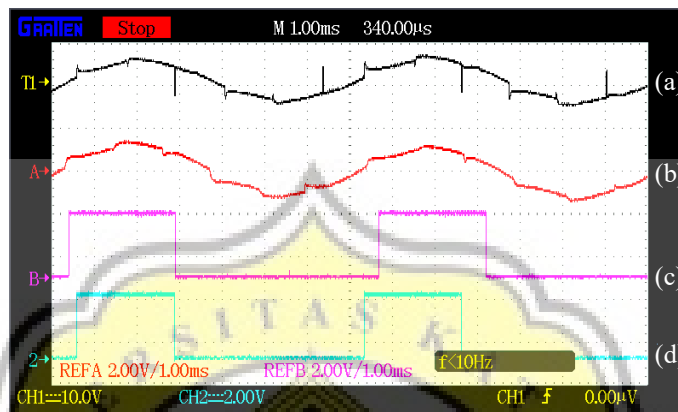


Gambar-4.14. (a) Gelombang arus fasa-A input 24 Volt DC (b) gelombang arus fasa-B input 24 Volt DC (c) gelombang arus fasa-C input 24 Volt DC. (probe x1, skala 1.00ms/div, CH1 500mV/div, RefA 500mV/div, CH2 500mV/div)



Gambar-4.15. Hasil Pengukuran Kecepatan menggunakan Tachometer Digital yang menunjukkan hasil kecepatan 5484 RPM.

Metode ini juga mampu mengoperasikan motor BLDC pada kecepatan rendah, perlu adanya kompensasi sudut komutasi agar motor BLDC tanpa sensor dapat beroperasi pada kecepatan rendah.



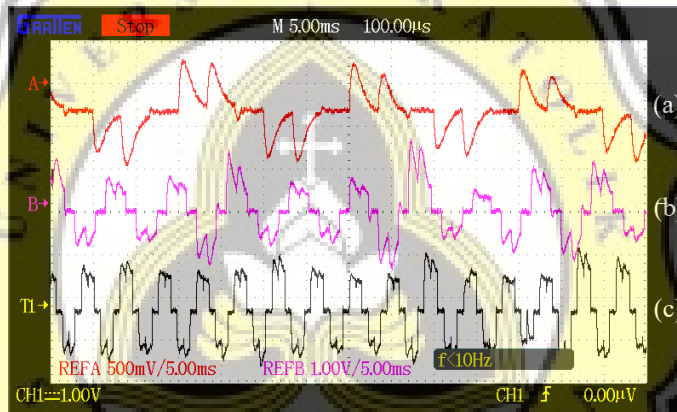
Gambar-4.16. (a) Gelombang BEMF sebelum LPF yang merepresentasikan 360 derajat elektrik (b) gelombang BEMF yang telah tergeser karena LPF (c) sudut eksitasi 60°–180° (d) sudut eksitasi 30°–150° (probe x1, skala 1.00ms/div, CH1 10V/div, CH2 2V/div, RefA 2V/div, RefB 2V/div)

Sinyal (Gambar-4.16a) adalah sinyal BEMF sebelum melewati LPF, pada kondisi ini, sinyal belum tergeser. Sinyal (Gambar-4.16b) adalah sinyal BEMF setelah melewati LPF, pada kondisi ini, BEMF telah tergeser. Sinyal yang telah tergeser ini digunakan sebagai referensi untuk menentukan sudut eksitasi. Satu perioda (Gambar-4.16a) dan (Gambar-4.16b) merepresentasikan 360° elektrik. Sinyal (Gambar-4.16c) adalah komutasi yang disetel pada sudut yang standar yaitu 30° – 150° elektrik. Sinyal (Gambar-4.16d) merupakan sinyal yang telah dikompensasi -30° elektrik, jadi sudut komutasinya adalah pada 0° – 120°. Sinyal ini tergeser -30° untuk mengkompensasi *error* yang dihasilkan oleh LPF. Dapat di lihat pada Gambar-4.16. bahwa sinyal (Gambar-4.16d) yang telah terkompensasi memiliki frekuensi yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan sinyal (Gambar-4.16c). Dengan sumber tegangan dan beban yang konstan, kecepatan motor dapat

bertambah. Merujuk pada hal ini dapat disimpulkan bahwa torka yang dihasilkan lebih tinggi, dibuktikan dengan hubungan antara *power* (P), *torque* (τ), dan kecepatan (n).

$$\frac{P}{\tau} \approx n \quad (4.1)$$

Dengan sumber tegangan yang konstan dan beban yang konstan, metode ini dapat menghasilkan kecepatan yang lebih tinggi. Rentang kecepatan juga menjadi lebih luas setelah menggunakan metode ini.



Gambar-4.17. (a) Gelombang arus saat kecepatan rendah (b) gelombang arus saat kecepatan menengah (c) gelombang arus saat kecepatan tinggi.

Gelombang arus yang dihasilkan dapat di lihat pada Gambar-4.17. Sinyal (Gambar-4.17a) diukur pada kecepatan rendah (600 RPM), sinyal (Gambar-4.17b) diukur pada kecepatan menengah (2000 RPM), sinyal (Gambar-4.17c) diukur pada kecepatan tinggi (3500 RPM). Perbaikan pada sudut komutasi sangat mempengaruhi operasi motor BLDC pada rentang kecepatan yang luas. Metode ini dapat menggeser dan memperbaiki fasa secara leluasa sehingga dapat digunakan pada rentang kecepatan yang luas. Metode ini telah diuji pada skala laboratorium.

4.3. Pembahasan

Kendali tanpa sensor diterapkan untuk motor BLDC untuk menghilangkan rugi-rugi yang ditimbulkan oleh pemakaian sensor. Pengujian dilakukan sesuai dengan tegangan kerja motor BLDC dengan tipe 42BLF01 yang memiliki tegangan kerja sebesar 24 Volt DC. Pada dasarnya kendali tanpa sensor ini menggunakan BEMF sebagai data referensi untuk penentuan sudut komutasi. BEMF dideteksi menggunakan BEMF detektor, kemudian dilakukan proses *filtering* menggunakan LPF, kemudian BEMF yang telah difilter diubah menjadi sinyal digital, kemudian diolah di dalam Mikrokontroler dsPIC30F4012. Parameter tegangan masukan ke konverter yaitu menggunakan nilai 12 Volt DC, 15 Volt DC, dan 24 Volt DC. Dengan menggunakan tegangan masukan 12 Volt DC, kecepatan yang dihasilkan oleh motor BLDC adalah 2756 RPM. Dengan menggunakan tegangan masukan 15 Volt DC, kecepatan yang dihasilkan oleh motor BLDC adalah 3416 RPM. Dengan menggunakan tegangan masukan 24 Volt DC, kecepatan yang dihasilkan oleh motor BLDC adalah 5484 RPM.

Motor BLDC juga diuji pada kecepatan rendah hingga kecepatan tinggi menggunakan metode perbaikan fasa. Dibutuhkan metode tersendiri untuk dapat mengoperasikan motor BLDC pada kecepatan rendah. Pada pengujian kecepatan rendah, motor BLDC diuji pada kecepatan 600 RPM, pada kecepatan menengah motor BLDC diuji pada kecepatan 2000 RPM, dan pada kecepatan tinggi motor BLDC diuji pada kecepatan 3500 RPM. Semakin tinggi nilai tegangan masukan, maka kecepatan yang dihasilkan akan semakin tinggi. Berikut adalah hasil pengujian berbentuk tabel dengan parameternya.

Tabel-4.1. Hasil pengujian kecepatan motor BLDC dengan kendali tanpa sensor

Tegangan (Volt DC)	Kecepatan yang dihasilkan (RPM)
12	2756
15	3416
24	5484

Tabel-4.2. Hasil pengujian kecepatan motor pada kecepatan rendah hingga kecepatan tinggi

Kategori Kecepatan	Kecepatan yang diujikan (RPM)
Rendah	600
Sedang	2000
Tinggi	3500

