



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

DESAIN PERALATAN DIAGNOSA BLDC BERBASIS TES SURJA UNTUK JENIS GANGGUAN ANTAR BELITAN

Bernadictus Brian Kelvianto
NRP 07111540000126

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 202

Halaman ini sengaja dikosongkan



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**DESAIN PERALATAN DIAGNOSA BLDC BERBASIS TES
SURJA UNTUK JENIS GANGGUAN ANTAR BELITAN**

Bernadictus Brian Kelvianto
NRP 07111540000126

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE 184801

**DIAGNOSTIC EQUIPMENT DESIGN OF BLDC BASED BY
SURGE TEST FOR INTER TURN FAULT**

Bernadictus Brian Kelvianto
NRP 07111540000126

Supervisor(s)
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology and Informatics Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul “**Desain Peralatan Diagnosa BLDC Berbasis Tes Surja untuk Jenis Gangguan Antar Belitan**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan- bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2020

Bernadictus Brian Kelvianto
NRP. 0711154000126

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESAIN PERALATAN DIAGNOSA BLDC BERBASIS TES
SURJA UNTUK JENIS GANGGUAN ANTAR BELITAN**

TUGAS AKHIR


Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
NIP. 198109052005011002

**SURABAYA
JUNI, 2020**

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESAIN PERALATAN DIAGNOSA BLDC BERBASIS TES
SURJA UNTUK JENIS GANGGUAN ANTAR BELITAN**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing II



Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19800603200641003

**SURABAYA
JUNI, 2020**

Halaman ini sengaja dikosongkan

Desain Peralatan Diagnosa BLDC Berbasis Tes Surja untuk Jenis Gangguan Antar Belitan

Nama mahasiswa : Bernadictus Brian Kelvianto
Dosen pembimbing I : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Dosen pembimbing II : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

Abstrak

Kerusakan pada motor BLDC sering terjadi pada bagian belitannya. Kerusakan pada belitan inilah yang menyebabkan terjadinya hubung singkat antar belitan pada motor BLDC. Kondisi hubung singkat ini dapat merusak motor BLDC jika dibiarkan ataupun tak terdeteksi. Sangat penting untuk mengidentifikasi kerusakan hubung singkat. Tes surja adalah metode yang efektif digunakan untuk mengetahui kondisi motor BLDC. Pengujian surja dilakukan dengan memberi tegangan surja kepada belitan motor BLDC. Untuk membangkitkan tegangan surja dibutuhkan rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC. Tegangan yang dihasilkan rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC ini disimpan ke kapasitor surja. Kemudian kapasitor surja mengalirkan muatan surja ke belitan motor BLDC. Hasil pengujian surja dihitung menggunakan metode *Error Area Ratio*. Metode ini membandingkan nilai gelombang pada kondisi normal dengan nilai gelombang pada kondisi gangguan. Sehingga dapat menentukan kondisi motor dikatakan normal atau dalam keadaan rusak. Nilai EAR akan ditampilkan pada layar LCD. Pada pengujian normal motor BLDC, nilai *threshold test-reff* EAR yang didapatkan dibawah 10% sehingga masih dalam kriteria *pass/fail* Baker. Pada kondisi motor BLDC *short* antar belitan fasa A-B, A-C, dan B-C nilai *threshold test-reff* EAR memiliki nilai maksimal 95,94%, 96,64%, dan 96,65%. Nilai *threshold test-reff* EAR melebihi kriteria *pass/fail* yang terindikasi terjadi gangguan akibat *short*.

Kata kunci: Peralatan Tegangan Tinggi, Motor BLDC, Tes Surja, Hubung Hingkat, *Error Area Ratio*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DIAGNOSTIC EQUIPMENT DESIGN OF BLDC BASED BY SURGE TEST FOR INTER TURN FAULT

Name : Bernadictus Brian Kelvianto
Supervisor I : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Supervisor II : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

Abstract

Damage to the BLDC motor often occurs at the turns. This winding damage that causes a short circuit between windings on the BLDC motor. This short circuit condition can damage the BLDC motor if unchecked or not detected. It is important to identify short circuit damage. The surge test is an effective method used to determine the condition of a BLDC motor. The surge test is carried out by giving surge voltage to the BLDC motor windings. To generate a surge voltage a DC high voltage generator is needed. The voltage generated by this DC high voltage generator circuit is stored to the surge capacitor. Then the surge capacitor flows the surge charge to the BLDC motor windings. The surge test results are calculated using the Error Area Ratio method. This method compares the wave value under normal conditions with the wave value under disturbance conditions. So that we can determine the condition of the motor is be normal or in a damaged state. The EAR value will be displayed on the LCD screen. This detection is in real time so that you will get a percentage of the EAR value directly. In the normal testing of the BLDC motor, the value of the EAR test-Reff threshold obtained below 10% so that still in Baker's pass/fail criteria. In the condition of the short BLDC motor between phases A-B, A-C, and B-C the threshold test-Reff of EAR has a maximum value of 95.94%, 96.64%, and 96.65%. The value of the EAR test-Reff threshold exceeds the pass/file criteria that occur due to short interference.

Key Word: *High Voltage Equipment, BLDC Motors, Surge Test, Short Circuit, Error Area Ratio*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**Desain Peralatan Diagnosa BLDC Berbasis Tes Surja untuk Jenis Gangguan Antar Belitan**”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya yang menunjang kelancaran proses penyelesaian tugas akhir ini.
2. Ibu dan Bapak penulis atas doa yang selalu dipanjatkan dan kasih sayang yang menjadi semangat dan motivasi untuk penulis dalam keadaan apapun.
3. Bapak Dimas Anton Asfani selaku dosen pembimbing pertama yang telah memberikan arahan, bimbingan, saran, kritik dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Heri Suryoatmojo selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan arahan, bimbingan, saran, kritik dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
5. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang nyaman.
6. Mas Alif Farabi, Yulizar Edo dan Mas Siswanto yang telah membantu dalam pembuatan alat.
7. Teman-teman e55 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas.

Surabaya, Juni 2020

Bernadictus Brian Kelvianto
0711154000126

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan	3
1.7 Relevansi	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Motor BLDC	6
2.2 Kegagalan Isolasi Pada Belitan Motor	7
2.3 Tes Surja	8
2.3.1 Pembangkit tegangan tinggi DC	10
2.3.2. <i>Switch</i> penghubung	10
2.3.3. Kapasitor Tegangan Tinggi	11
2.4 Standar Pengujian Surja	12
2.5 Metode <i>Error Area Ratio</i> (EAR)	13
2.6 Kriteria Pass/ Fail Surge Test	14
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM DAN ALAT	16
3.1 Konfigurasi Sistem	16
3.1.1 Pembangkit Tegangan Tinggi DC	17
3.1.2 Rangkaian Mikrokontroler	18

3.1.3 Switch	18
3.1.4 Kapasitor Tegangan Tinggi	19
3.1.5 Motor BLDC	19
3.1.6 <i>Verivolt Entube DE-HB</i>	20
3.1.7 <i>Symmetric Supply and Offset Correction</i>	22
3.2 Perancangan <i>Hardware</i>	22
3.2.1 Pembangkit Tegangan Tinggi DC	23
3.2.2 Rangkaian Kapasitor Surja.....	24
3.2.3 Perancangan Rangkaian <i>Switching</i>	25
3.2.4 <i>Symmetric Supply and Offset Correction</i>	26
3.3 Perancangan Mikrokontroler	27
3.3.1 Program <i>Switching</i>	27
3.3.2 Program <i>Error Area Ratio</i>	28
3.4 Perancangan Perangkat Motor BLDC	29
3.5 Perancangan Skema Tes surja	31
3.5.1 Pengujian Tes Surja dengan <i>Fault Antar Turn</i> Dalam Satu Fasa 31	
3.5.2 Pengujian Hubung Singkat Antar Fasa.....	33
BAB 4 HASIL DAN ANALISIS	38
4.1 Hasil dan Analisis Pengujian Rangkaian <i>Walton Cockroft</i>	38
4.2 Hasil dan Analisis Pengujian <i>Rise time</i> Gelombang Surja	39
4.3 Hasil dan Analisis Tes surja Pada Motor BLDC Normal	40
4.4 Hasil dan Analisa Tes Surja Kondisi Hubung Singkat Antar Belitan Dalam Satu Fasa	42
4.5 Hasil dan Analisis Tes surja Kondisi Hubung singkat Antar Belitan Pada Fasa Yang Berbeda.....	46
4.6 Data <i>Threshold</i> Hasil Pengujian	50
BAB 5 PENUTUP	52
5.1 Kesimpulan	52
5.2 Saran.....	52
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN	54
BIODATA PENULIS	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Struktur Motor BLDC.....	6
Gambar 2. 2 Stator Motor BLDC	7
Gambar 2. 3 Kerusakan pada belitan	8
Gambar 2. 4 Respon gelombang surja pada kondisi normal dan kondisi hubung singkat	9
Gambar 2. 5 Rangkaian Ekivalensi Pembangkit Tegangan Tinggi.....	10
Gambar 2. 6 Rangkaian <i>Switch</i> penghubung	11
Gambar 2. 7 Skema kapasitor tegangan tinggi	11
Gambar 2. 8 Standar <i>rise time</i> IEEE 522	12
Gambar 3. 1 Skema konfigurasi alat pengujian surja	15
Gambar 3. 2 Konfigurasi Alat	16
Gambar 3. 3 Rangkaian ekivalensi pembangkit tegangan tinggi	17
Gambar 3. 4 Rangkaian <i>switch</i> penghubung.....	19
Gambar 3. 5 Rangkaian kapasitor surja	19
Gambar 3. 6 <i>Verivolt Entube DE-HB</i>	20
Gambar 3. 7 Konfigurasi <i>Verivolt Entube DE-HB</i> (1).....	21
Gambar 3. 8 Konfigurasi <i>Verivolt Entube DE-HB</i> (2).....	21
Gambar 3. 9 Konfigurasi <i>Verivolt Entube DE-HB</i> (3).....	22
Gambar 3. 10 Implementasi Rangkaian <i>Walton Cockroft</i>	24
Gambar 3. 11 Implementasi Kapasitor Surja	25
Gambar 3. 12 (a) <i>switching</i> IGBT (b) <i>switching</i> HV Relay.....	25
Gambar 3. 13 Implementasi Rangkaian <i>Switching</i>	26
Gambar 3. 14 Implementasi Rangkaian <i>Symmetric Supply and Offset Correction</i>	26
Gambar 3. 15 Mikokontroler STM32F407VGT6.....	26
Gambar 3. 16 <i>Flowchart</i> program mikrokontroler	27
Gambar 3. 17 Konfigurasi Belitan Motor BLDC.....	28
Gambar 3. 18 Skema belitan motor BLDC pada stator	29
Gambar 3. 19 Motor BLDC Tes Surja.....	30
Gambar 3. 20 Skema tes surja dengan hubung singkat antar <i>Turn</i> A1	31
Gambar 3. 21 Skema tes surja dengan hubung singkat antar <i>Turn</i> B2	31
Gambar 3. 22 Skema tes surja dengan hubung singkat antar <i>Turn</i> C3	32
Gambar 3. 23 Skema tes surja antar fasa	33
Gambar 3. 24 Skema tes surja fasa A-B	34
Gambar 3. 25 Skema tes surja fasa A-C	35
Gambar 3. 26 Skema tes surja fasa B-C	36

Gambar 4. 1	Grafik perbandingan pengujian dengan perhitungan	38
Gambar 4. 2	Grafik kondisi Normal AN	40
Gambar 4. 3	Tes surja dalam satu fasa A	41
Gambar 4. 4	Perbandingan gelombang referensi dan hubung singkat fasa A-N.....	42
Gambar 4. 5	Perbandingan gelombang referensi dan hubung singkat fasa B-N.....	43
Gambar 4. 6	Perbandingan gelombang referensi dan hubung singkat fasa C-N.....	44
Gambar 4. 7	Tes surja dengan hubung singkat antar belitan	45
Gambar 4. 8	Perbandingan gelombang Referensi degan hubung singkat A-B	46
Gambar 4. 9	Perbandingan gelombang Referensi degan hubung singkat A-C	47
Gambar 4. 10	Perbandingan gelombang Referensi degan hubung singkat B-C	45

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Standar pengujian surja	13
Tabel 2. 2 Standar Metode EAR.....	14
Tabel 3. 1 Spesifikasi <i>Reed Relay</i>	19
Tabel 3. 2 Spesifikasi IGBT	19
Tabel 3. 3 Perhitungan Walton Cockroft	23
Tabel 4. 1 Hasil pengujian dan perhitungan rangkaian <i>Walton Cockroft</i>	37
Tabel 4. 2 Standar <i>threshold test-reff</i> EAR kondisi normal pada fasa AN	39
Tabel 4. 3 Hasil pengujian <i>test-reff</i> EAR Motor BLDC kondisi Normal	40
Tabel 4. 4 Hasil <i>Test-reff</i> EAR pengujian fasa A-N	42
Tabel 4. 5 Hasil <i>Test-reff</i> EAR pengujian fasa B-N	43
Tabel 4. 6 Hasil <i>Test-reff</i> EAR tes surja fasa C-N	44
Tabel 4. 7 Hasil analisis tes surja antar fasa pada belitan 7	46
Tabel 4. 8 Hasil analisis tes surja antar fasa pada belitan 7	47
Tabel 4. 9 Hasil analisis tes surja antar fasa pada belitan 7	49
Tabel 4. 10 Nilai <i>Threshold</i> Belitan Normal	49
Tabel 4. 11 Nilai <i>Threshold</i> Hubung Singkat	50

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Motor Brushless DC (BLDC) adalah motor tanpa sikat dengan magnet tetap sebagai rotor. Motor dengan teknologi ini memiliki berbagai variasi dalam pemanfaatannya karena dalam aplikasinya memiliki banyak keuntungan antara lain efisiensi tinggi karena tidak ada sikat, perbandingan torsi lebih besar karena medan tarik yang dihasilkan oleh stator sepenuhnya diterima oleh rotor, polusi suara lebih rendah karena tidak ada gesekan, dan masih banyak lagi. Karakteristik yang dimiliki motor BLDC inilah yang membuat aplikasi motor BLDC makin bervariasi. Motor ini sudah diterapkan pada kendaraan, salah satunya adalah GESITS (Garasindo *Electronic Scooter* ITS). Skuter listrik ini memanfaatkan motor BLDC sebagai penggerakannya.

Skuter listrik GESITS memiliki beberapa kelebihan juga yaitu kapasitas dan performa baterai yang baik. Dengan keunggulan tersendiri diharapkan skuter listrik GESITS ini dapat membantu mengatasi penggunaan bahan bakar fosil dan penanggulangan emisi karbon pada kendaraan bermotor. Untuk menunjang performa motor BLDC yang digunakan pada skuter listrik GESITS diperlukan perawatan dan pengecekan secara berkala.

Motor akan mengalami kerusakan jika dipakai terus menerus. Kerusakan pada umumnya terjadi pada belitan stator dan bearing. Kondisi ini sering terjadi isolasi pada belitan yang terdapat pada motor BLDC terkelupas sehingga menyebabkan gangguan performanya. Kerusakan antar belitan di stator bisa menyebabkan kegagalan yang fatal untuk suatu peralatan, sehingga dibutuhkan perawatan pada motor. Pendeteksian kerusakan dibutuhkan diawal untuk mengetahui jenis kerusakan yang terjadi pada motor sebelum melakukan perawatan. Pendeteksi kerusakan berupa alat yang dapat mengetahui kerusakan yang terjadi pada antar belitan stator motor. Menggunakan tes surja sebagai pembangkit dan penyalur tegangan tinggi yang dapat menghasilkan gelombang dan dapat dianalisa. Tegangan surja yang dihasilkan akan dianalisa perbedaannya pada saat sebelum dan sesudah motor BLDC diberi gangguan hubung singkat. Metode deteksi kerusakan yang digunakan untuk menganalisa hasil diagnosis yaitu *Error Area Ratio* (EAR). Alat pendeteksi ini yang nantinya bisa mendeteksi kerusakan secara *real time*.

1.2 Permasalahan

Pada skuter listrik GESITS tidak memerlukan pemeliharaan yang bermacam-macam seperti kendaraan berbahan bakar fosil, tetapi skuter listrik GESITS memerlukan diagnosa untuk mengetahui kondisi dan kualitas motor yang sedang digunakan. Kerusakan yang sering terjadi pada motor listrik adalah pada belitannya. Dibutuhkan alat uji dengan tegangan tinggi agar kerusakan pada belitan motor BLDC dapat terdeteksi dengan baik.

Tes surja adalah pengujian yang pada umumnya digunakan untuk mengetahui kondisi isolasi pada belitan. Dari tes surja menghasilkan tegangan surja yang akan diberikan pada belitan motor BLDC. Tegangan surja didapatkan dengan pembangkit tegangan DC yang dihubungkan dengan *switching*.

Hasil dari tegangan surja menghasilkan osilasi yang kemudian dianalisa dengan metode EAR. Hasil dari metode EAR ini akan diketahui kondisi motor BLDC yang normal atau rusak.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat alat yang mampu mendeteksi gangguan antar belitan di motor BLDC. Menggunakan pengujian surja sebagai pembangkit tegangan tinggi. Dilakukan pengujian agar dapat dianalisa untuk dijadikan kesimpulan. Manfaat dari penelitian ini dapat dijadikan acuan untuk penelitian lebih lanjut mengenai gangguan antar belitan pada motor BLDC.

1.4 Batasan Masalah

Batasan pada masalah ini adalah :

1. Menggunakan Tes Surja untuk pengujian
2. Pengujian dilakukan pada motor BLDC
3. Gangguan yang dideteksi yaitu antar belitan

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan referensi dari makalah, jurnal dan buku tentang proses pengerjaan tugas akhir ini. Referensi yang dicari berkaitan dengan pengujian surja dan motor

BLDC beserta peralatan yang mendukung dalam pembuatan alat pendeteksi gangguan.

2. Perancangan dan Pemodelan Alat
Pada tahap ini dilakukan perancangan alat pendeteksi gangguan pada motor BLDC berbasis tegangan surja berdasarkan dari studi literatur yang sudah dilakukan.
3. Pengujian Alat
Setelah model alat jadi, dilakukan proses pengujian untuk mengetahui kinerja alat. Pengujian dilakukan dengan menggunakan tegangan surja untuk mendeteksi dan menampilkan bahwa motor BLDC mengalami gangguan *turn to turn*.
4. Analisa Data
Pada tahap ini dilakukan analisa data terhadap alat pendeteksi dapat bekerja atau tidak jika terdapat gangguan *turn to turn* pada motor BLDC.
5. Penarikan Kesimpulan
Di akhir penelitian dapat ditarik kesimpulan berdasarkan hasil analisa yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

BAB 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi.

BAB 2 : Tinjauan Pustaka

Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir. Teori penunjang yang digunakan adalah seperti motor BLDC, kegagalan isolasi, tes surja, pembangkitan tegangan tinggi DC, standar uji, dan *Error Area Ratio* (EAR).

BAB 3 : Perancangan dan pemodelan alat

Bab ini membahas mengenai perancangan alat untuk melakukan pengujian. Perancangan alat tersebut meliputi perancangan motor BLDC , perancangan alat uji surja, dan penggunaan alat pengukuran.

BAB 4 : Hasil dan pembahasan

Bab ini membahas mengenai pengambilan data uji surja, pengolahan gelombang surja, dan analisis terhadap hasil data yang didapatkan saat pengujian.

BAB 5 : Penutup

Bab ini membahas mengenai kesimpulan dan saran yang bisa diambil dari pengujian yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Dari penelitian yang dilakukan dapat memberikan manfaat :

1. Untuk Institusi
Menjadi referensi dalam hal penelitian tentang kerusakan belitan pada motor BLDC
2. Untuk Industri
Menjadi referensi dalam hal industri mekatronik di bidang motor listrik

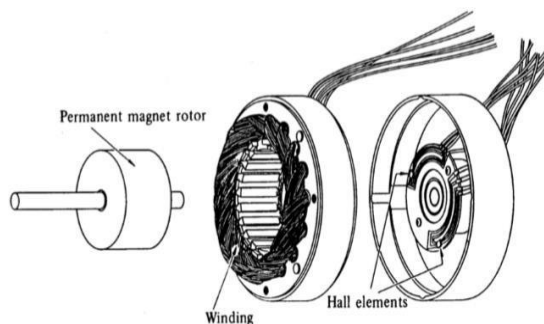
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor BLDC

Motor *Brushless* DC (BLDC) adalah motor sinkron yang didukung oleh arus searah listrik (DC) dan memiliki sistem pergantian elektronik dikontrol, bukan sistem pergantian mekanis berdasarkan sikat. Dalam motor, arus dan torsi, tegangan dan RPM berbanding lurus. Di motor BLDC, electromagnet tidak bergerak sebaliknya permanen magnet berotasi dan belitan jangkar statis[1]. Untuk mentransfer arus ke jangkar belitan, sistem sikat digantikan dengan elektronik kontroler. Kontroler melakukan distribusi daya yang sama dengan sikat pada DC motor dengan menggunakan *Solid State Static* daripada sistem sikat. Konstruksi motor BLDC hampir menyerupai motor AC disebut juga motor sinkron dengan magnet permanen. Konstruksi motor BLDC dapat dilihat pada gambar. Pada bagian lilitan stator memiliki konstruksi hampir sama dengan bentuk lilitan pada motor AC.

Motor BLDC adalah salah satu motor yang paling pesat penggunaannya. Bisa digunakan dalam bidang industri otomotif, medis, dan instrumentasi. Motor BLDC tidak menggunakan sikat jadi membuat motor ini memiliki beberapa keuntungan antara lain efisiensi tinggi, perbandingan torsi lebih besar, polusi suara lebih rendah, jangka operasi panjang[1][2]



Gambar 2.1 Struktur Motor BLDC

Prinsip kerja dari motor BLDC merupakan teori medan magnet yaitu saat kutub utara dan kutub selatan menghasilkan medannya masing-

masing maka akan saling tolak menolak dengan kutub yang sejenis. Kutub yang tidak sejenis juga akan saling tarik menarik sehingga menimbulkan arus listrik.[1]



Gambar 2.2 Stator Motor BLDC

2.2 Kegagalan Isolasi Pada Belitan Motor

Kegagalan isolasi pada belitan adalah salah satu kerusakan yang sering terjadi. Kegagalan isolasi menyebabkan kinerja motor menurun dan bisa merusak struktur motor listrik. Banyak faktor terjadi kegagalan tetapi yang paling umum adalah kegagalan antar belitan. Kerusakan ini disebabkan karena isolasi pada belitan tidak mampu menahan arus dan tegangan pada konduktor yang kemudian terhubung dengan belitan lain. Terhubungnya antar belitan dapat mempengaruhi nilai induktansi dari motor listrik. Akibat dari kegagalan isolasi antar belitan akan membuat beberapa kegagalan lain yaitu *turn to ground* atau *turn to turn* yang akan membuat belitan stator rusak. Kegagalan umum dalam motor BLDC adalah salah satu kawat stator dibuka atau dipendekkannya atau *inter turn short*. Jika tidak dideteksi sejak awal maka kegagalan ini menimbulkan efek yang besar pada mesin listrik[2][3]



Gambar 2.3 Kerusakan pada belitan

2.3 Tes Surja

Tes Sekitar 80% dari semua kegagalan listrik di stator berasal dari isolasi antar belitan[3]. Tes surja adalah tes *offline* yang sangat umum digunakan untuk mengetahui kondisi isolasi antar belitan di stator[4]. Tes surja adalah metode tes yang sudah memiliki stardart IEEE yang bisa digunakan untuk kontrol kualitas dan *predictive maintenance*. Dengan pengisian kapasitor secara cepat dan menghasilkan tegangan impuls akan bisa mengetahui kondisi isolasi antar belitan. Hasil dari tes surja bisa ditampilkan dalam osiloskop yang berbentuk gelombang surja saat belitan sedang di uji[5].

Tes surja dilakukan dengan mengalirkan arus pada belitan dengan cepat sehingga timbul tegangan pada belitan sesuai dengan prinsip induksi pada belitan. Nilai dari induksi pada belitan stator dapat dihitung menggunakan persamaan

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

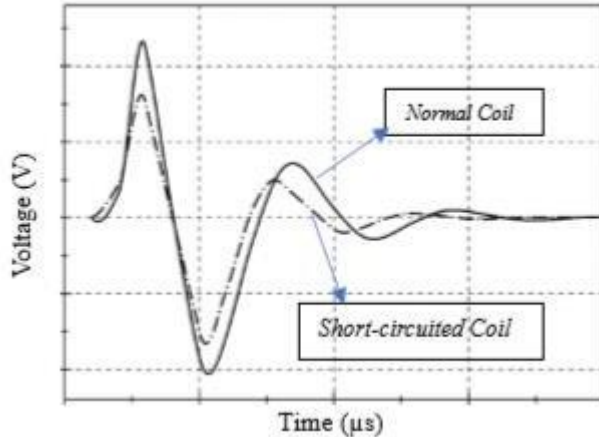
Dimana

- V = Tegangan terminal yang timbul pada belitan
- L = Insuktansi pada belitan

Tegangan terminal adalah tegangan total yang tibul akibat adanya induktansi pada belitan. Peralatan pembangkit tegangan surja didesain agar dapat mengetahui kerusakan yang terjadi pada belitan karenan gangguan hubung singkat antar belitan.

Kapasitor yang telah berisi muatan dengan tegangan tertentu dihubungkan dengan belitan motor sehingga terjadi *discharge*. Jika terjadi hubung singkat antar belitan, maka frekuensi respon tegangan surja pada

belitan juga berubah. Dibawah ini merupakan grafik respon gelombang surja pada motor pada saat kondisi normal dan saat hubung singkat.



Gambar 2.4 Respon gelombang surja pada kondisi normal dan kondisi hubung singkat

Gelombang surja yang terbentuk memiliki frekuensi osilasi yang timbul pada belitan motor yang dimodelkan pada persamaan berikut

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (2.2)$$

Dimana:

f = frekuensi

R = jumlah resistansi rangkaian

L = nilai induktansi belitan trafo

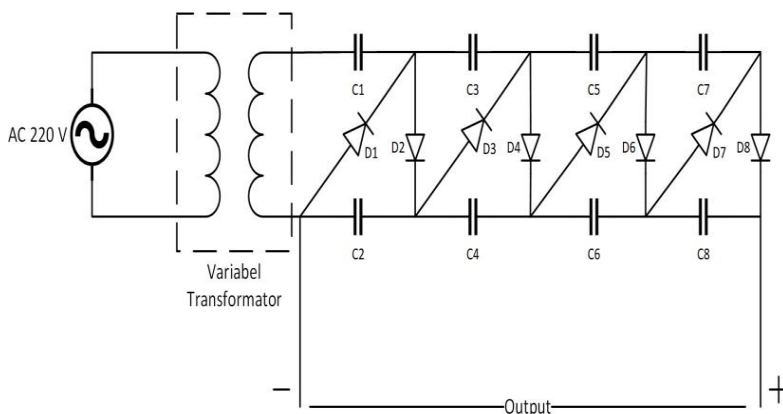
C = nilai kapasitansi kapasitor surja

Dari persamaan diatas dapat diketahui jika isolasi belitan rusak, maka menyebabkan induktansi belitan menurun, sehingga frekuensi isolasi akan bertambah[3]. Tes surja terdiri dari beberapa bagian, yaitu

bagian pembangkit tegangan tinggi DC, *switch* penghubung, dan kapasitor tegangan tinggi

2.3.1 Pembangkit tegangan tinggi DC

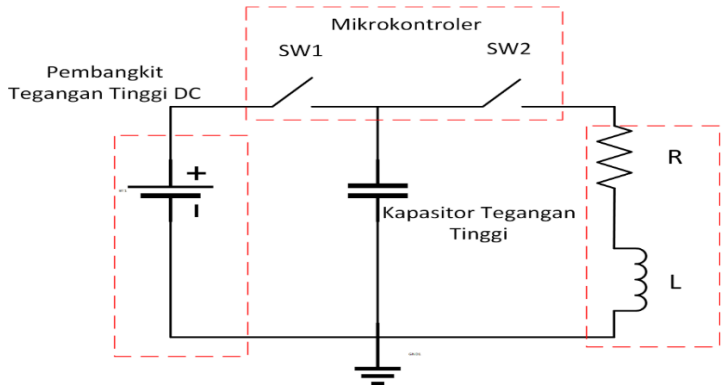
Pembangkit tegangan tinggi DC dilakukan dengan cara menghubungkan tegangan AC 220 V ke rangkaian *Walton Cockroft*. Nilai *input* 220 V AC diatur dengan menggunakan autotrafo sehingga mendapatkan nilai tegangan *output* DC yang sesuai dengan tegangan surja yang akan digunakan. Berikut merupakan rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC yang menggunakan rangkaian *Cockroft Walton 4 stage*



Gambar 2.5 Rangkaian Ekuivalen Pembangkit Tegangan Tinggi

2.3.2. *Switch* penghubung

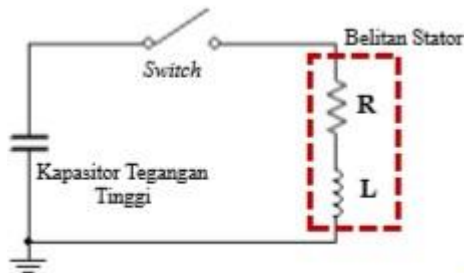
Switch penghubung yang digunakan terdiri atas 2 buah *switch* yang memiliki rating tegangan diatas 1000 V, tegangan ini agar mekanisme *switching* berjalan baik. 2 buah *switch* selanjutnya dikontrol oleh mikrokontroler



Gambar 2.6 Rangkaian *Switch* Penghubung

2.3.3. Kapasitor Tegangan Tinggi

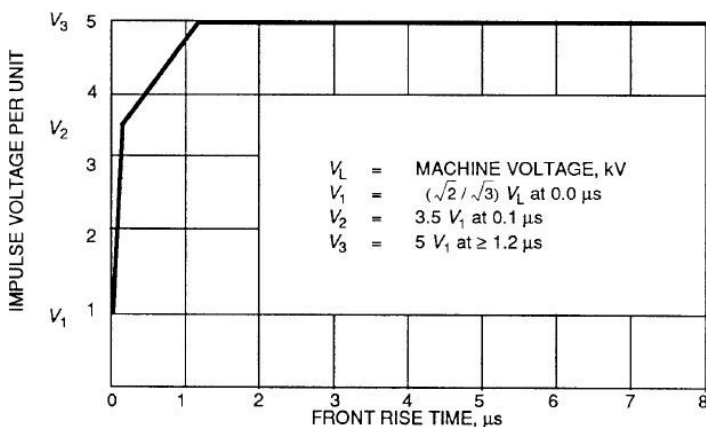
Dalam pengujian surja dibutuhkan kapasitor dengan rating tegangan tinggi karena tegangan yang muncul bisa mencapai ribuan volt. Kapasitor mendapat supply dari pembangkit tegangan tinggi DC, pada saat itu terjadi *charging* pada kapasitor. Ketika kapasitor penuh oleh muatan kemudian switch aktif menghubungkan antar kapasitor dan belitan, sehingga kapasitor mengalami *discharge*. Terdapat beda potensial antar kapasitor dan belitan sehingga arus mengalir dari kapasitor menuju belitan. Pada kondisi ini muncul respon gelombang surja berbentuk sinyal *transient* yang semakin mengecil seiring bertambah waktu.



Gambar 2.7 Skema Kapasitor Tegangan Tinggi

2.4 Standar Pengujian Surja

Dalam pengujian surja terdapat standar yang minimal harus dipenuhi. Standar tegangan surja harus dipenuhi agar tegangan mampu melewati sela udara diantara belitan. Menurut *Baker Instrument*, tegangan yang disarankan adalah 500 V agar dapat melewati celah udara diantara belitan. Tegangan uji surja bergantung ada nilai rise time tegangan surja yang digunakan serta spesifikasi motor yang diuji. Menurut IEEE 522, nilai rise time menyebabkan timbulnya frekuensi yang cukup tinggi saat tegangan surja melalui belitan. [9]



Gambar 2.8 Standar *rise time* IEEE 522

Pada gelombang dengan nilai rise time 0 sampai 100ns, direkomendasikan tegangan uji sebesar 1 p.u. Untuk nilai rise time 100ns dan 1,2 μs direkomendasikan tegangan uji sebesar 3,5 p.u. Sedangkan nilai rise time 1,2 μs atau lebih direkomendasikan tegangan uji sebesar 5 p.u. Namun perbedaan isolasi belitan membuat hasil tes surja bervariasi. Untuk standar yang diberikan EASA lebih umum digunakan karena tidak memberikan rincian rise time pada nilai standarnya. [7]

Tabel 2.1 Standar tegangan pengujian surja

		IEEE 522		EASA
		New Coil	In Service	In Service
VLine	Per Unit	3,5 p.u.	75% New	2*VLine+1000
480	392	1372	1029	1960
575	469	1643	1232	2150
600	490	1715	1289	2200
2300	1878	6573	4930	5600
4160	3397	11888	8916	9320
6900	5634	19718	14789	14800
13800	11268	39437	29578	28600

2.5 Metode *Error Area Ratio* (EAR)

Error Area Ratio (EAR) adalah sebuah metode yang membandingkan 2 gelombang yang mana gelombang ini sulit dilihat dengan kasat mata. Dengan metode EAR kelayakan dari belitan motor induksi dapat ditentukan. Adapun persamaannya :

$$EAR = \frac{\sum_{i=1}^N |F_i^{(1)} - F_j^{(2)}|}{\sum_{j=1}^N |F_i^{(2)}|} \times 100 \quad (2.4)$$

$F_i(1)$ = Nilai gelombang referensi, $F_j(2)$ = Nilai gelombang uji dan N adalah jumlah data yang dibandingkan[5]. Metode EAR ada beberapa macam seperti *pulse-to-pulse* (P-P) EAR, *line-to-line* (L-L) EAR, *zero crossing*, dan *test-ref* EAR.

Pulse-to-pulse (P-P) EAR merupakan metode EAR untuk menganalisis gelombang surja secara *real time*. Perbedaan terlihat pada amplitudo tegangan yang muncul dan bentuk gelombang relatif sama kondisi normal.

Line-to-line (L-L) EAR merupakan metode EAR untuk belitan mesin listrik tiga fasa. Dengan membandingkan hasil uji dari antar fasa dan perbedaan hasil ujinya. Apabila terdapat perbedaan hasil uji yang melebihi standart maka kemungkinan terjadi gangguan.

Test-ref EAR merupakan metode EAR yang perhitungannya membandingkan pengujian dengan kondisi normal. Dengan kata lain untuk pengujian ini tidak berpatokan pada standar internasional untuk referensi gelombangnya[4],[5].

2.6 Kriteria Pass/ Fail Surge Test

Dengan adanya kriteria *Pass/Fail* sebagai acuan, motor BLDC dapat diidentifikasi mengalami gangguan hubung singkat atau tidak. Kriteria *Pass/Fail* yang digunakan meliputi *Test-Ref* EAR, P-P EAR, L-L EAR dan *Zero Crossing*.

Tabel 2.2 Standar Metode EAR

	L-L EAR (%)	P-P EAR (%)	Zero Crossing (%)	Test-Ref EAR (%)
<i>Manufacturing</i>	5-15 <i>No Rotor-installed</i>	5-15	5-20	5-15
<i>Rotor Installed</i>	15-65	5-15	10-25 or higher	10-25 or higher

Dari kriteria diatas, nilai kriteria yang digunakan pada penelitian ini menggunakan *manufacturing* dan *No rotor installed*. Kriteria yang digunakan yaitu untuk L-L EAR menggunakan 15% dan untuk *Test-Ref* menggunakan 10%. Nilai ini menjadi parameter pada motor BLDC saat pengujian surja. Apabila hasil tes surja melebihi nilai kriteria, maka motor BLDC tersebut dapat diindikasikan mengalami gangguan kerusakan.[7][9].

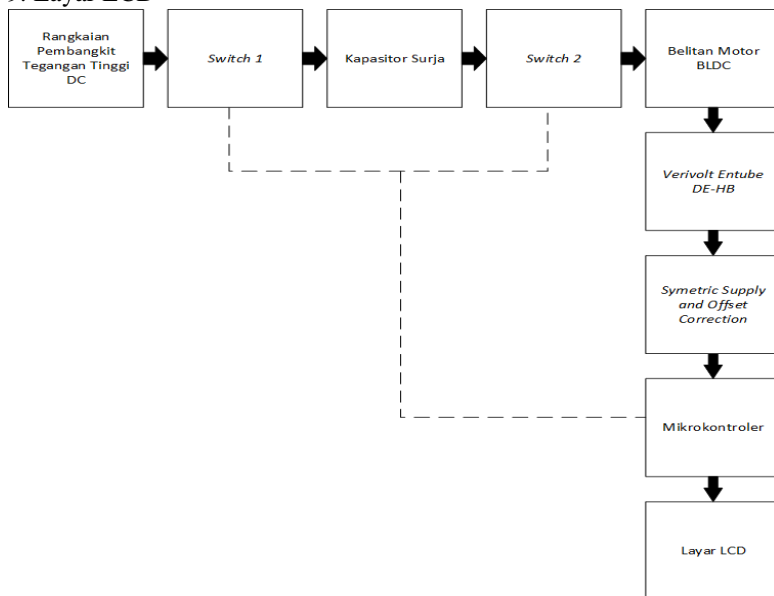
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM DAN ALAT

3.1 Konfigurasi Sistem

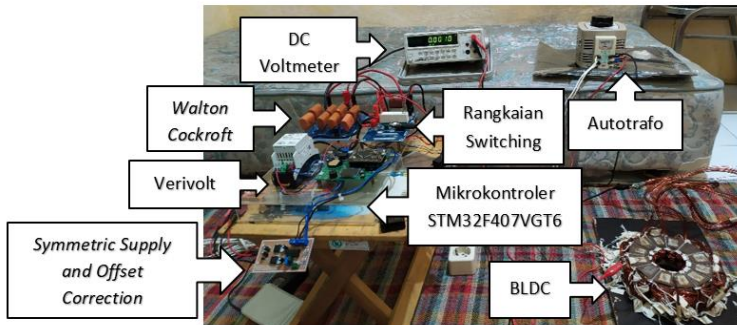
Pengujian alat untuk mendeteksi kerusakan antar belitan meliputi beberapa hal, diantaranya perancangan rangkaian tes surja dan perancangan belitan motor BLDC.

Pada rangkaian alat terdapat beberapa komponen yaitu :

1. Autotrafo untuk mengatur tegangan dari sumber PLN
2. Rangkaian *Walton Cockroft 4 stage*
3. Rangkaian *Switching*
4. Kapasitor Surja
5. Belitan Motor BLDC
6. *Verivolt Entube DE-HB*
7. Rangkaian *Symmetric Supply and Offset Correction*
8. Rangkaian Mikrokontroler
9. Layar LCD



Gambar 3.1 Blok Diagram Alat Pengujian Surja

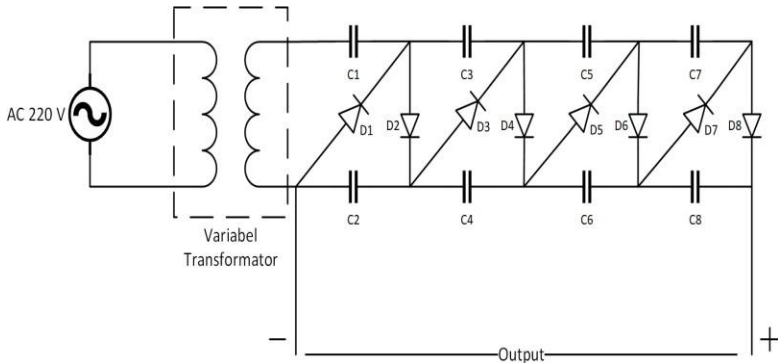


Gambar 3.2 Konfigurasi Alat

Pengujian tegangan surja dilakukan dengan menghubungkan sumber AC 220 V dari PLN ke autotrafo. Untuk mengubah menjadi tegangan tinggi DC dihubungkan dengan rangkaian *Walton Cockroft*. Tegangan yang telah dinaikkan selanjutnya mengisi kapasitor surja. Pengisian kapasitor surja dilakukan dengan mengaktifkan kedua *switch*. Kedua *switch* dikendalikan dari mikrokontroler. *Switch 1 close* selama 5 detik, sehingga kapasitor surja terisi oleh muatan (*charging*). Disaat itu juga *switch 2 open*. Setelah 5 detik, *switch 1 open* dan *switch 2 close* sehingga muatan surja mengalir pada belitan motor BLDC (*discharge*). *Verivolt* terhubung secara paralel dengan belitan motor BLDC. *Verivolt* bekerja sebagai *voltmeter* yang mengubah besaran nilai tegangan dari belitan motor BLDC menjadi besaran nilai tegangan yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Karena mikrokontroler tidak bisa membaca gelombang negatif, maka dipasang rangkaian *Symmetric Supply and Offset Correction* untuk pengondisian sinyal sebelum masuk ke mikrokontroler. Data yang diolah oleh mikrokontroler akan ditampilkan langsung ke layar LCD.

3.1.1 Pembangkit Tegangan Tinggi DC

Pada bagian pembangkit tegangan tinggi DC memiliki dua bagian utama, yaitu autotrafo dan rangkaian *Walton Cockroft*. Autotrafo digunakan untuk mengatur tegangan sumber dari PLN yang akan digunakan untuk *input* tegangan rangkaian *Walton Cockroft*. Rangkaian *Walton Cockroft* digunakan sebagai rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC.



Gambar 3.3 Rangkaian Ekivalen Pembangkit Tegangan Tinggi

3.1.2 Rangkaian Mikrokontroler

Mikrokontroler yang digunakan adalah STM32F407VGT6. Memiliki inti mikrokontroler STM32F407VGT6 dengan prosesor ARM Cortex M4 32 bit dengan inti FPU, *memory flash* 1 Mb dan RAM 192 Kb yang dikemas dalam LQFP100. Memiliki catu daya aplikasi eksternal 3V dan 5V. Dapat diprogram menggunakan STM Cube IDE yang dihubungkan menggunakan *ST-Link V2*. STM32F407VGT6 pada penelitian ini digunakan untuk akuisisi data dan *switching* pengujian surja. Terdapat *memory card* untuk menyimpan hasil data pengujian.

3.1.3 Switch

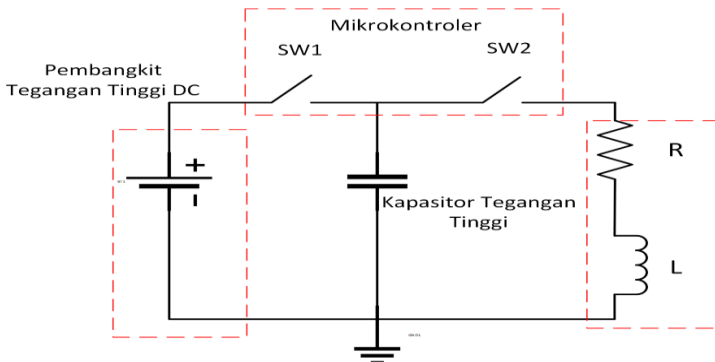
Kapasitor tegangan tinggi terhubung dengan pembangkit tegangan tinggi DC yang kemudian dihubungkan dengan belitan motor BLDC maka dibutuhkan *switch*. Ada 3 komponen utama, yaitu *switch 1 Reed Relay*, *switch 2 IGBT*, dan Mikrokontroler. *Switch* akan diatur oleh mikrokontroler sebagai *programmable interface*-nya.

Tabel 3.1 Spesifikasi *Reed Relay*

Contact	Condition	Value
<i>Isolation across contact</i>	<i>DC or AC peak</i>	10 kV
<i>Maximum switching voltage</i>	<i>DC or AC peak</i>	7 kV
<i>Maximum switching current</i>	<i>DC or AC peak</i>	2 A
<i>Release time</i>	<i>Diode Fitted</i>	2ms

Tabel 3.2 Spesifikasi IGBT

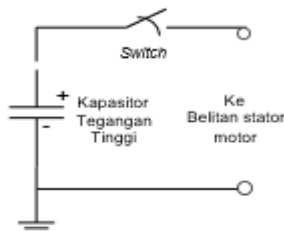
	Parameter	Max
V_{CES}	Collector to Emitter Voltage	1200 V
$I_C @ T_C = 25^{\circ}C$	Continuous Collector Current	105 A
$I_C @ T_C = 100^{\circ}C$	Continuous Collector Current	60 A
$I_F @ T_C = 25^{\circ}C$	Diode Continuous Forward Current	120 A
$I_F @ T_C = 100^{\circ}C$	Diode Continuous Forward Current	60 A
$V_{FM} @ I_C = 60 A$	Diode Forward Voltage Drop	2.20 V
$t_d(on)$	Turn-On Delay Timer	94 ns



Gambar 3.4 Rangkaian *Switch* Penghubung

3.1.4 Kapasitor Tegangan Tinggi

Kapasitor tegangan tinggi merupakan media untuk menyimpan tegangan. Proses pengujian dapat dilakukan ketika kapasitor dapat mengalirkan muatan surja ke belitan motor BLDC dengan kondisi *switch* sebagai penghubung operasi



Gambar 3.5 Rangkaian Kapasitor Surja

3.1.5 Motor BLDC

Motor BLDC yang digunakan adalah motor dengan spesifikasi ukuran kawat 0.8 mm^2 , paralel 16 kawat dan memiliki 8 *turn* setiap fasa agar daya maksimum yang dihasilkan 5 kW. Setiap kondisi belitan yang ada diberi penanda berupa nomor untuk setiap urutan belitan (nomor1-8), untuk mempermudah pengujian tegangan tinggi surja pada kondisi baik maupun rusak. Dengan pemberian nomor akan bervariasi untuk pengujian dan lebih mudah untuk pengambilan data.

3.1.6 Verivolt Entube DE-HB

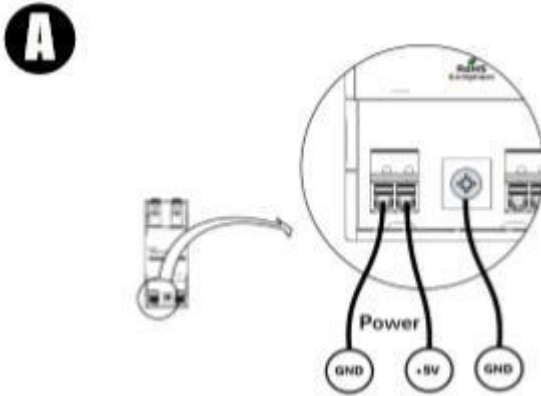
Verivolt Entube DE-HB digunakan untuk merekam data tegangan yang merupakan sensor tegangan dengan spesifikasi tegangan *input* maksimal hingga 2000 V dan tegangan *output* $\pm 1\text{V}$ sampai dengan $\pm 10\text{V}$. *Verivolt* dirancang untuk memungkinkan pengukuran sinyal tegangan tinggi di industri dan untuk penelitian.



Gambar 3.6 *Verivolt Entube DE-HB*

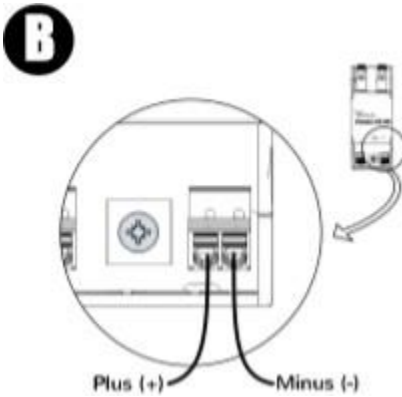
Konfigurasi *hardware* pada *Verivolt Entube DE-HB*:

- a) Sensor *ground* dihubungkan dengan kabel menuju pentanahan. Disisi kiri dari sensor *ground* terdapat 2 konektor sumber yang terdiri dari konektor *ground* dan *input* dari sumber. *Input* sumber dihubungkan dengan sumber eksternal sebesar 5 V.



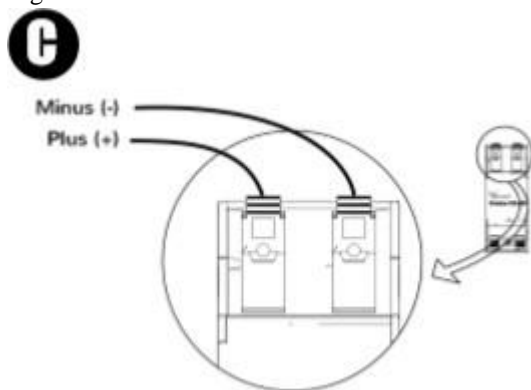
Gambar 3.7 Konfigurasi *Verivolt Entube DE-HB* (1)

b) Sepasang kabel dihubungkan pada masing masing konektor yang sesuai dengan *input* arus pada DAQ. Polaritas dari sinyal keluaran harus sesuai dengan sinyal *input*.



Gambar 3.8 Konfigurasi *Verivolt Entube DE-HB* (2)

c) Pada sisi primer dihubungkan sepasang kabel sesuai tanda positif dan negatif.



Gambar 3.9 Konfigurasi Verivolt Entube DE-HB (3)

3.1.7 Symmetric Supply and Offset Correction

Symmetric Supply and Offset Correction adalah rangkaian untuk pengondisian sinyal sebelum masuk mikrokontroler, dikarenakan mikrokontroler hanya memiliki input 0V sampai 3V. *Symmetric Supply and Offset Correction* terdiri dari 2 rangkaian utama yang terhubung.

a) *Symmetric Supply* adalah rangkaian pemberi tegangan pada rangkaian *Offset Correction*. Tegangan yang diberi harus konstan agar *OpAmp* pada rangkaian *Offset Correction* dapat bekerja secara maksimal. Terdiri dari kapasitor, regulator, dan baterai.

b) *Offset Correction* adalah rangkaian pengondisian sinyal yang terdiri dari *Voltage Divider*, *High Pass Filter*, *OpAmp*, kapasitor dan *potensiometer*. Rangkaian ini menaikkan *setting point* atau nilai tengah dari suatu sinyal, sehingga dapat terbaca oleh mikrokontroler.

3.2 Perancangan Hardware

Untuk perancangan pengujian tegangan surja meliputi perancangan rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC menggunakan *autotrafo* dan rangkaian *Walton Cockroft 4 stage*, rangkaian *switching*, pembuatan rangkaian kapasitor surja, pembuatan rangkaian *Symmetric Supply and Offset Correction* dan desain motor BLDC

3.2.1 Pembangkit Tegangan Tinggi DC

Perancangan pembangkit tegangan tinggi DC terdiri dari beberapa komponen utama yaitu sumber AC 220V, autotrafo, dan rangkaian *Walton Cockroft 4 stage*. *Input* dari sumber AC 220V diturunkan menggunakan autotrafo. *Output* dari autotrafo dihubungkan pada rangkaian rangkaian *Walton Cockroft*. Rangkaian *Walton Cockroft* didesain 4 *stage* yang terdiri dari 2 dioda dan 2 kapasitor pada setiap *stage*-nya. Pemilihan 4 *stage* bertujuan untuk memberikan tegangan *output* yang lebih tinggi sehingga dapat digunakan pada pengujian tegangan surja.

$$V_{out} = n \cdot \sqrt{2} \cdot V_{eff} \quad (3.1)$$

Dimana:

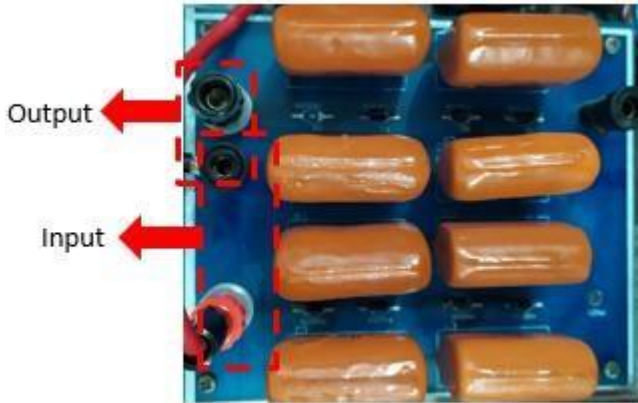
V_{out} : Tegangan *output* (V)

n : Jumlah *stage* (*max* 4 *stage*)

V_{eff} : Tegangan efektif *Input* AC (V)

Tabel 3. 3 Perhitungan *Walton cockroft*

Veff (V)	Stage 1 (V)	Stage 2 (V)	Stage 3 (V)	Stage 4 (V)
0	0	0	0	0
20	28,28	56,57	84,85	113,14
40	56.57	113.14	169.70	226.27
60	84,85	169,70	254,56	339,41
80	113.13	226.27	339.41	452.54
100	141,42	282,84	424,26	565,68
120	169.70	339.41	509.11	678.82
140	197,99	395,98	539,97	791,96
160	226.27	452.54	678.82	905.09
180	254,56	509,12	763,68	1018,23
200	282.84	565.68	848.52	1131.37
220	311.12	662.25	993.38	1244.5



Gambar 3.10 Implementasi Rangkaian *Cockroft Walton 4 Stage*

3.2.2 Rangkaian Kapasitor Surja

Rangkaian kapasitor surja berfungsi sebagai *supply* teggangan dengan cara menyimpan (*charging*) dan melepas (*discharge*) muatan surja. Kapasitor ini akan terhubung dengan *switch*. *Rating* kapasitor surja yang dipakai pada rangkaian ini yaitu 1,6 kV. Pengisian muatan kapasitor surja membutuhkan waktu tertentu sampai kapasitor dapat terisi penuh. Persamaan perubahan muatan yang terjadi

$$V_C = E \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3.2)$$

Dengan penjelasan,

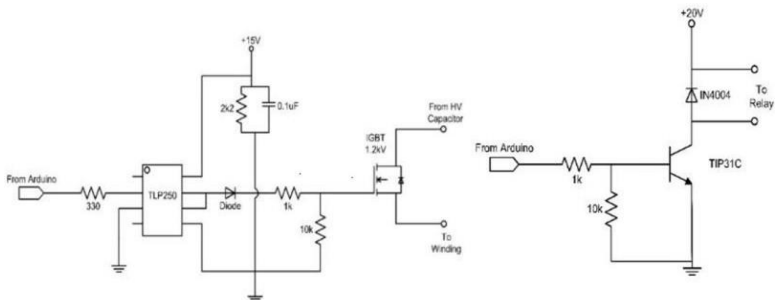
- V_c : Teggangan kapasitor (V)
- E : Teggangan sumber (1000 V)
- R ; Tahanan (Ω)
- C : Kapasitansi (10nF)



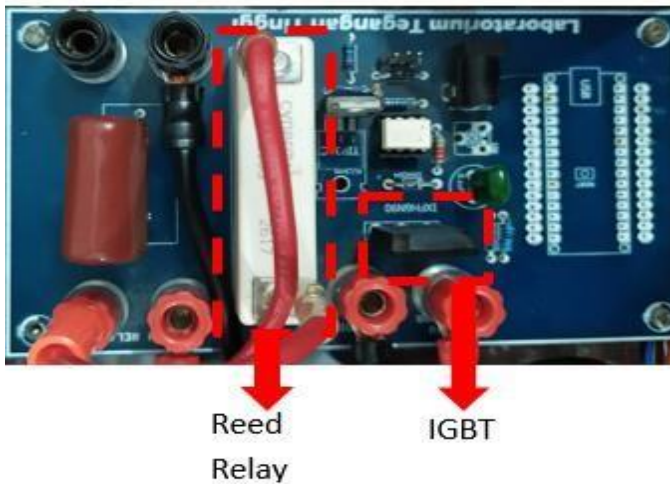
Gambar 3.11 Implementasi Kapasitor Surja

3.2.3 Perancangan Rangkaian *Switching*

Rangkaian *switching* berfungsi sebagai saklar untuk mengisi (*charging*) dan mengeluarkan (*discharge*) muatan kapasitor surja. Di rangkain *switching* terdapat 2 buah *switch* yang diatur oleh mikrokontroler. *Switch* 1 digunakan untuk mengisi muatan kapasitor surja sedangkan *switch* 2 digunakan untuk mengeluarkan muatan kapasitor surja ke belitan motor BLDC. Ketika proses pengisian (*charging*) maka *switch* 1 *close* hingga 5 detik sedangkan pada *switch* 2 dalam keadaan *open*. Setelah 5 detik dan kapasitor terisi oleh muatan, maka *switch* 1 *open* dan *switch* 2 *close* sehingga muatan pada kapasitor mengalir ke belitan motor BLDC untuk pengujian surja.



Gambar 3.12 (a) *switching* IGBT (b) *switching* HV Relay



Gambar 3.13 Implementasi Rangkaian *Switching*

3.2.4 *Symmetric Supply and Offset Correction*

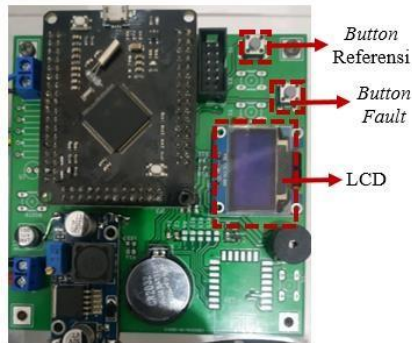
Symmetric Supply and Offset Correction adalah rangkaian untuk pengondisian sinyal sebelum masuk mikrokontroler, dikarenakan mikrokontroler hanya memiliki input 0V sampai 3V. Berikut implementasinya.



Gambar 3.14 Implementasi Rangkaian *Symmetric Supply and Offset Correction*

3.3 Perancangan Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah perangkat yang digunakan untuk mengontrol *switching* rangkaian surja dan untuk mengakuisi data dari *output Symmetric Supply and Offset Correction*. Di dalam rangkaian mikrokontroler terdapat 2 *button* yaitu *button reff* dan *button fault*. Ketika *button reff* ditekan maka pengujian dimulai dan pengambilan data referensi dilakukan. Hasil dari data referensi disimpan di *memory card* yang akan digunakan untuk data pembanding dengan pengujian *fault*. Ketika *button fault* ditekan maka pengujian dimulai. Data referensi dan pengujian *fault* disimpan di *memory card* dan diolah oleh mikrokontroler menggunakan rumus EAR. Terdapat layar LCD untuk menampilkan hasil perhitungan dalam bentuk persentase EAR.

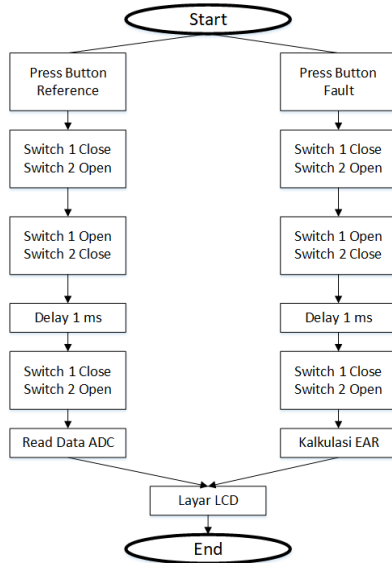


Gambar 3.15 Mikokontroler STM32F407VGT6

3.3.1 Program *Switching*

Mikrokontroler digunakan sebagai pengontrol rangkaian *switching*. Logika sederhana untuk *switching* yang dirancang yaitu sebagai berikut:

- Pada kondisi awal, *switch 1* dan *switch 2 open*
- *Switch 1 close* selama 5 detik sehingga kapasitor surja terisi muatan
- Setelah 5 detik, *switch 1 open*
- *Delay* selama 1 ms
- *Switch 2 close* selama 50 ms sehingga muatan pada kapasitor mengalir ke belitan.



Gambar 3.16 Flowchart program mikrokontroler

Diawali dengan menekan *button reff* sebagai awal pengujian dan pengambilan data referensi. Referensi tersimpan dalam *memory card*. Kemudian *button fault* untuk melakukan pengujian dengan membandingkan data referensi dengan data *fault*.

3.3.2 Program *Error Area Ratio*

Mikrokontroler juga digunakan untuk akuisisi data. Besaran nilai dari *output verivolt* yang sudah melewati *Symmetric Supply and Offset Correction* akan menjadi data nilai tegangan yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Data tersebut diolah oleh mikrokontroler sehingga menghasilkan data nilai tegangan sebenarnya.

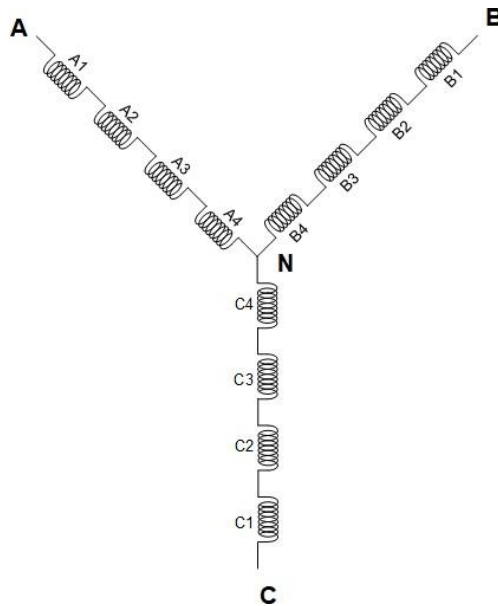
Untuk memperoleh EAR, mikrokontroler diprogram sesuai persamaan 2.4 diatas dengan mengambil data referensi dan data

pengujian. Kemudian hasil perhitungan ditampilkan dalam bentuk persentase EAR melalui layar LCD.

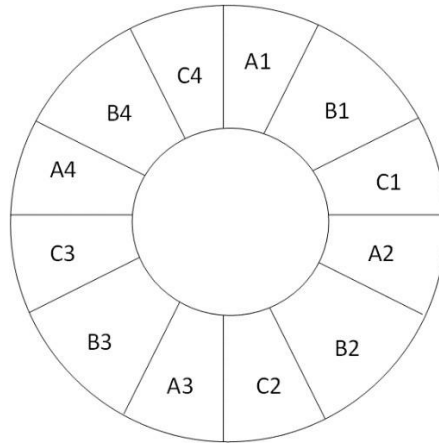
3.4 Perancangan Perangkat Motor BLDC

Motor BLDC yang digunakan untuk pengujian memiliki spesifikasi seperti berikut:

- Kawat 0.8 mm^2
- Pararel 16 Kawat
- 8 *Turn* Per fasa
- Tegangan maksimum 5 kW



Gambar 3. 17 Konfigurasi Belitan Motor BLDC



Gambar 3. 18 Skema belitan motor BLDC pada stator

Motor BLDC yang digunakan sebelumnya di atur terlebih dahulu pada saat penggulungan. Setiap fasa diberi tanda nomor 1-8 untuk tiap-tiap *turn* yang digulung. Sehingga terdapat penomoran pada masing-masing sisi motor BLDC. Penandaan menggunakan nomor ini akan mempermudah kombinasi dan variasi data hubung singkat anatar belitan sesuai kondisi yang ada. Pengujian dilakukan pada motor BLDC dalam keadaan normal. Data normal ini akan dijadikan sebagai gelombang referensi. Gelombang referensi adalah gelombang pembandingan yang menunjukkan apakah nilai motor BLDC dalam keadaan baik atau rusak.

Selanjutnya motor BLDC di uji dengan kondisi hubung singkat. Kondisi hubung singkat dapat diambil dengan cara mengupas lapisan isolasi kawat, kemudian ditambahkan kawat *extention* yang disambungkan pada terminal hubung singkat.

Setelah mengetahui data referensi dan *fault* pada beberapa bagian, maka dilakukan analisis menggunakan metode EAR. Dengan metode EAR, kita dapat melihat perbedaan motor BLDC pada saat normal dan pada saat *fault* dengan jelas.



Gambar 3. 19 Motor BLDC tes surja

3.5 Perancangan Skema Tes surja

Pengujian tegangan surja yang dilakukan pada motor BLDC dilakukan menurut skema. Pengujian dilakukan secara teratur agar mendapatkan hasil akurat dan membuktikan alat dapat menguji kerusakan pada antar belitan. Skema disusun berdasarkan kondisi hubung singkat yang akan diuji pada setiap fasa.

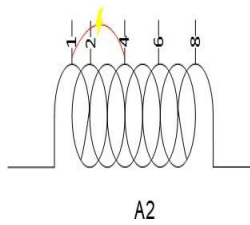
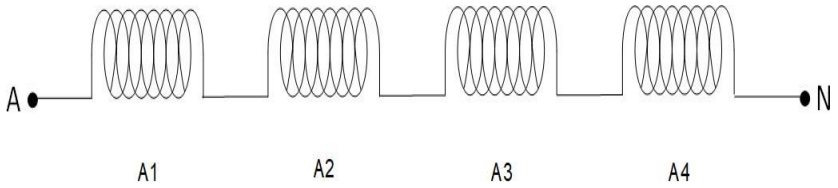
3.5.1 Pengujian Tes Surja dengan *Fault Antar Turn* Dalam Satu Fasa

Pengujian pertama dilakukan dengan memberikan kondisi hubung singkat antar turn pada beberapa bagian fasa. Setiap fasa memiliki 4 pengujian. Dalam fasa A terdapat A1, A2, A3, dan A4. Pada kondisi fasa B dan C juga sama dengan fasa A. Skema pengujian dilakukan dengan ketentuan sebagai berikut:

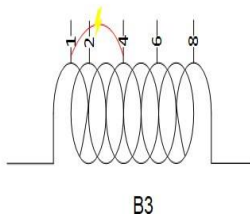
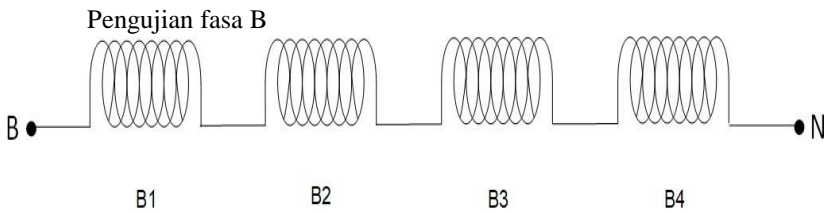
- Hubung singkat *Turn* 1 dengan *Turn* 2
- Hubung singkat *Turn* 1 dengan *Turn* 4
- Hubung singkat *Turn* 1 dengan *Turn* 6
- Hubung singkat *Turn* 1 dengan *Turn* 8

Pengujian dilakukan masing-masing 5 kali setiap skema pengujian untuk mendapatkan hasil data yang akurat.

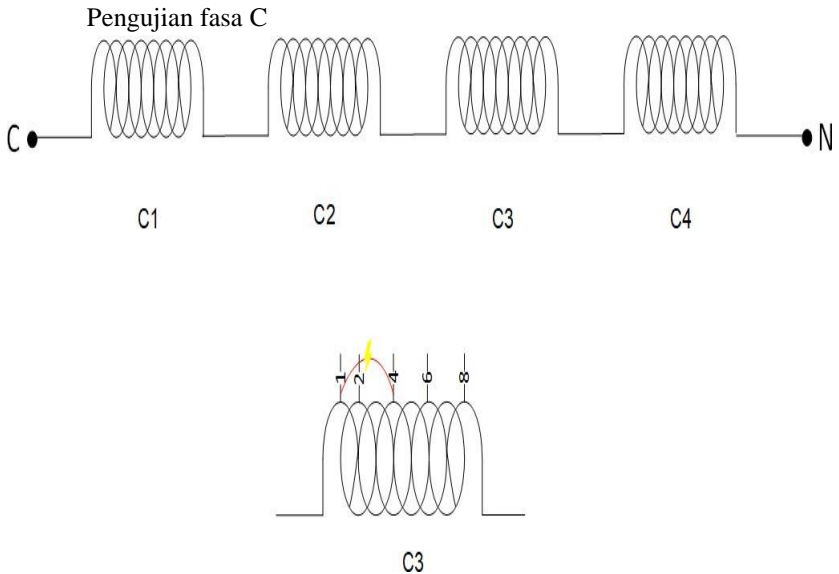
Berikut skema pengujian yang dilakukan pada fasa A.



Gambar 3. 20 Skema tes surja dengan hubung singkat antar *Turn* A1



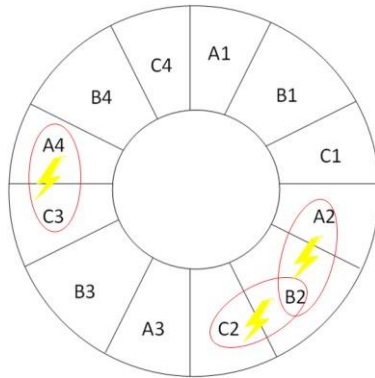
Gambar 3. 21 Skema tes surja dengan hubung singkat antar *Turn* B2



Gambar 3. 22 Skema tes surja dengan hubung singkat antar Turn C3

3.5.2 Pengujian Hubung Singkat Antar Fasa

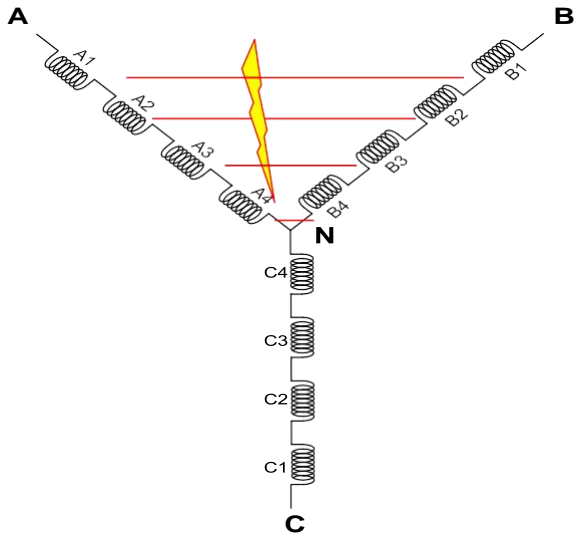
Pengujian hubung singkat antar fasa dilakukan pada kondisi fasa yang saling berdekatan, hubung singkat akan terjadi pada belitan-belitan yang saling bersinggungan. Sehingga untuk melakukan pengujian ini perlu diperhatikan skema perancangan motor BLDC. Pengujian dilakukan antar fasa yang berdekatan, seluruh fasa yang berdekatan di uji pada belitan ke 7, karena belitan ke 7 ada pada lokasi terluar tiap belitan sehingga rawan terkena hubung singkat dengan belitan pada fasa sebelahnya. A1-B1, B1-C1, C1-A2, st. samapi dengan C4-A1.



Gambar 3. 23 Skema tes surja antar fasa

Skema hubung singkat yang di uji mengikuti ketentuan sebagai berikut.

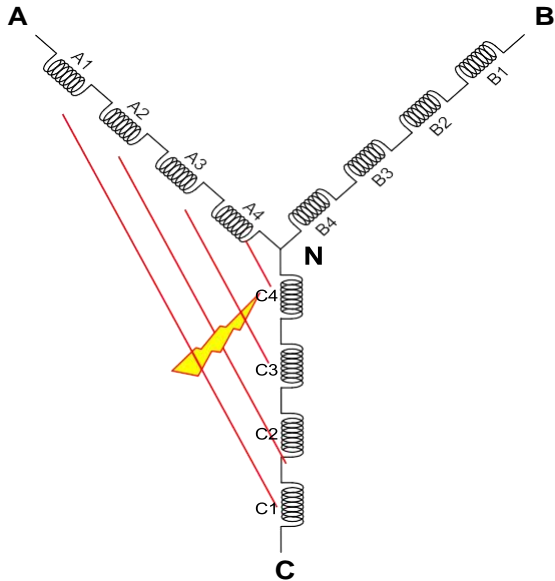
Pengujian fasa A-B



Gambar 3. 24 Skema tes surja fasa A-B

- Hubung singkat pada A1 *turn* 7 – B1 *turn* 7
- Hubung singkat pada A2 *turn* 7 - B2 *turn* 7
- Hubung singkat pada A3 *turn* 7 – B3 *turn* 7
- Hubung singkat pada A4 *turn* 7 – B4 *turn* 7

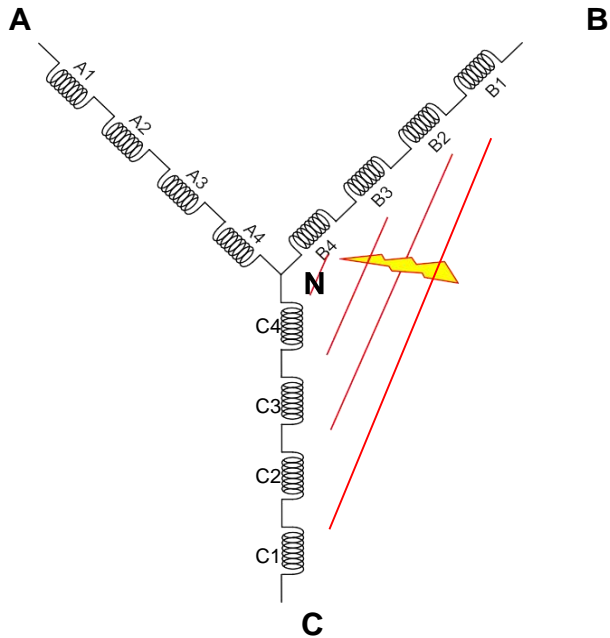
Pengujian fasa A-C



Gambar 3.25 Skema tes surja fasa A-C

- Hubung singkat pada A1 *turn* 7 – C4 *turn* 7
- Hubung singkat pada A2 *turn* 7 – C1 *turn* 7
- Hubung singkat pada A3 *turn* 7 – C2 *turn* 7
- Hubung singkat pada A4 *turn* 7 – C3 *turn* 7

Pengujian fasa B-C



Gambar 3. 26 Skema tes surja fasa B-C

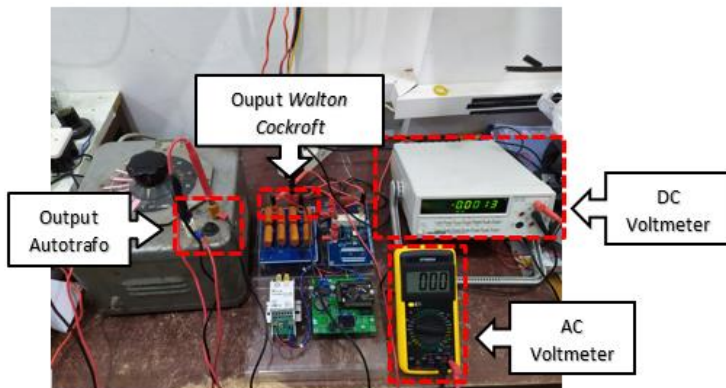
- Hubung singkat pada B1 *turn* 7 – C1 *turn* 7
- Hubung singkat pada B2 *turn* 7 – C2 *turn* 7
- Hubung singkat pada B3 *turn* 7 – C3 *turn* 7
- Hubung singkat pada B4 *turn* 7 – C4 *turn* 7

BAB 4 HASIL DAN ANALISIS

4.1 Hasil dan Analisis Pengujian Rangkaian Walton Cockroft

Pengujian rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC yang digunakan *Walton Cockroft*. Rangkaian *Walton Cockroft* dihubungkan dengan autotrafo dan yang menjadi sumber AC adalah PLN 220V. Tegangan dari autotrafo diubah secara bertahap dari 0 sampai 220V sesuai perhitungan. Autotrafo menjadi kontrol tegangan *output* yang dihasilkan oleh *Walton Cockroft* agar sesuai dengan yang kita inginkan. Peralatan yang digunakan untuk pengujian rangkaian *Walton Cockroft* yaitu DC *voltmeter* dan AC *voltmeter*. AC *voltmeter* digunakan untuk mengukur tegangan *output* dari autotrafo. Sedangkan DC *voltmeter* digunakan untuk mengukur tegangan *output* dari *Walton Cockroft*.

Tegangan *output* dari autotrafo dinaikkan bertahap dari 0V, 20V, 40V sampai 220V. Tegangan *output* dari *Walton Cockroft* juga diukur secara bersamaan ketika *level* tegangan terus dinaikkan. Kemudian hasil pengukuran tegangan DC dari *output* rangkaian *Walton Cockroft* dibandingkan dengan perhitungan rumus.

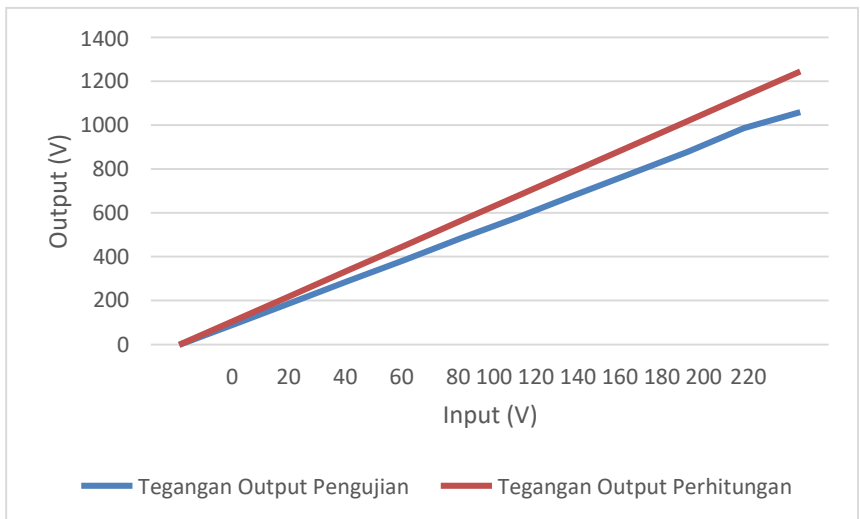


Gambar 4.1 Pengujian *Walton Cockroft*

Tabel 4. 1 Hasil pengujian dan perhitungan rangkaian *Walton Cockroft*

Tegangan Input AC (V)	Tegangan output pengujian (V)	Tegangan output perhitungan (V)
0	0	0
20	96.1	113.13
40	194.2	226.27
60	292.0	339.41
80	387.8	452.54
100	487.2	565.68
120	582.5	678.82
140	683.4	791.95
160	781.2	905.09
180	879.5	1018.23
200	988.2	1131.37
220	1060.7	1244.5

Dari hasil pengujian dapat terlihat perbedaan antara hasil perhitungan dengan hasil pengujian. Hal ini terjadi karena ada rugi rugi dari komponen dan *ripple* yang dihasilkan dari tegangan terbangkit.



Gambar 4.2 Grafik perbandingan *output* pengujian dengan perhitungan

4.2 Hasil dan Analisis Pengujian *Rise time* Gelombang Surja

Pengujian *rise time* memiliki tujuan untuk mengetahui nilai *rise time* dari gelombang surja yang terbentuk. Menggunakan standar tegangan tes surja dari IEEE 52 pada bagian *rise time* tegangan surja untuk melakukan pengujian *rise time*. Pengujian *rise time* digunakan untuk menentukan tegangan uji yang digunakan. Menurut IEEE 52 tegangan uji yang digunakan yaitu sebesar 3.5 pu untuk hasil pengujian *rise time* sebesar 1.2 μ s. Tetapi rekomendasi dari *Baker Instrument* mengatakan bahwa dalam hukum *Paschen* direkomendasikan tegangan minimal agar dapat melompat ke sela udara yaitu 500 V, yang berarti tegangan perhitungan pada standar IEEE 52 belum mencukupi sehingga harus menggunakan standar lain. Baker merekomendasikan juga menggunakan tegangan maksimum untuk tes surja dari standar EASA yaitu

$$V_{max} = (2 \times V_L) + 1000 \quad (4.1)$$

Sehingga nilai didapat 1400V. Karena keterbatasan rating peralatan *switching* yaitu komponen IGBT yang hanya memiliki tegangan maksimal 1200V, maka tegangan yang bisa digunakan hanya sampai 1000V untuk keamanan *switching*. Dipilih 800 V untuk tegangan pengujian karena sudah melewati tegangan minimal dari hukum *Paschen*.

4.3 Hasil dan Analisis Tes surja Pada Motor BLDC Normal

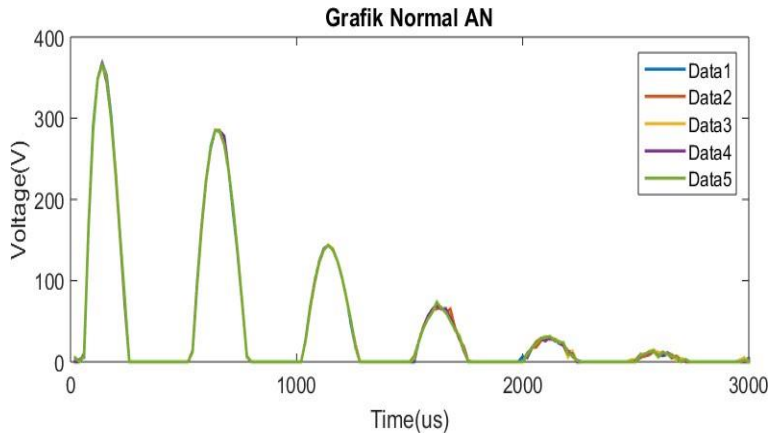
Pengujian pada kondisi normal dilakukan untuk mendapat nilai referensi yang akan dijadikan acuan untuk perbandingan nilai EAR. Dilakukan sebanyak 5 kali tiap percobaan, lalu dari 5 percobaan diambil nilai rata rata.

Tabel 4. 2 Standar *threshold test-ref* EAR kondisi normal pada fasa AN

Perbandingan Referensi Uji (%)	A1	A2	A3	A4	A5
P1	0	2.1	2.37	2.13	2.23
P2	2.1	0	2.65	2.39	2.17
P3	2.36	2.64	0	1.78	2.06
P4	2.14	2.39	1.79	0	1.171
P5	2.23	2.17	2.07	1.71	0

Percobaan	Rata-rata (%)
P1	1.766
P2	1.862

P3	1.768
P4	1.4982
P5	1.636



Gambar 4.3 Grafik kondisi Normal AN

Gelombang seharusnya terdapat nilai negatif, namun ada beberapa konfigurasi lagi yang harus dilakukan sehingga menghasilkan gelombang penuh. Namun karena kondisi wabah pandemi sehingga konfigurasi alat menjadi terhambat.

Dilakukan perhitungan yang sama seperti kondisi normal AN pada setiap fasa berikutnya. Sehingga menghasilkan nilai pada tabel 4.3

Tabel 4. 3 Hasil pengujian *test-reff* EAR Motor BLDC kondisi Normal

FASA	<i>Test-reff</i> EAR (%)
A-N	1.49
B-N	5.87
C-N	1.67
AB	0.76
AC	0.75
BC	0.65

Dari tabel 4.2 dapat dipakai sebagai acuan atau referensi untuk pengujian dengan kondisi tertentu. Jika dilakukan pengujian pada belitan

motor BLDC dengan skema hubung singkat, maka dapat dikatakan motor BLDC rusak. Menurut Baker *Instrument* nilai *threshold* untuk Test-reff EAR pada kondisi motor normal adalah 10%. Jika lebih dari 10% maka terdapat gangguan pada belitan motor.

4.4 Hasil dan Analisa Tes Surja Kondisi Hubung Singkat Antar Belitan Dalam Satu Fasa

Pengujian pada kondisi hubung singkat antar belitan dalam satu fasa dilakukan dengan skema pada bab 3. Dilakukan sebanyak 5 kali tiap percobaan, lalu dari 5 percobaan diambil nilai rata rata. Sehingga mendapatkan hasil yang akurat.

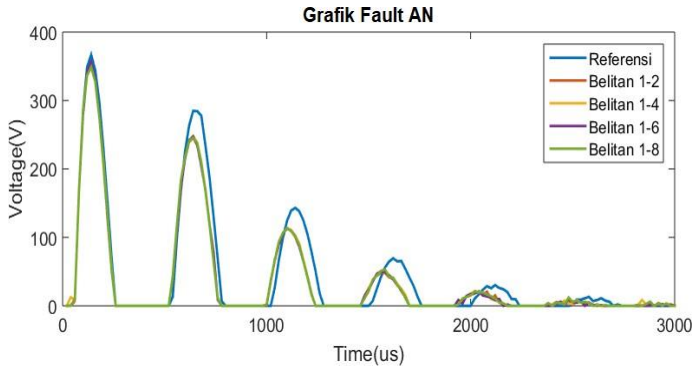
Pengujian surja dengan skema hubung singkat antar belitan dalam satu fasa ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kerusakan yang ditimbulkan karena gangguan hubung singkat dalam satu fasa. Hasil dari pengujian ini juga digunakan sebagai nilai acuan pada pengujian motor BLDC dengan kondisi tertentu



Gambar 4. 4 Tes surja dalam satu fasa A

4.5.1 Hubung Singkat Antar Belitan Pada Fasa A

Pada pengujian ini dilakukan dengan skema hubung singkat pada belitan 1 dengan belitan 2, belitan 1 dengan belitan 4, belitan 1 dengan belitan 6, dan belitan 1 dengan belitan 8. Tujuan dilakukannya pengujian ini yaitu untuk mengetahui kerusakan yang ditimbulkan akibat hubung singkat pada antar belitan dalam satu fasa. Didapatkan nilai pengujian pada tiap kondisi hubung singkat yang kemudian dibandingkan dengan nilai *threshold* pada kondisi normal. Sehingga menghasilkan nilai EAR pada kondisi hubung singkat.



Gambar 4. 5 Perbandingan gelombang referensi dan hubung singkat fasa A-N

Tabel 4. 4 Hasil *Test-reff* EAR pengujian fasa A-N

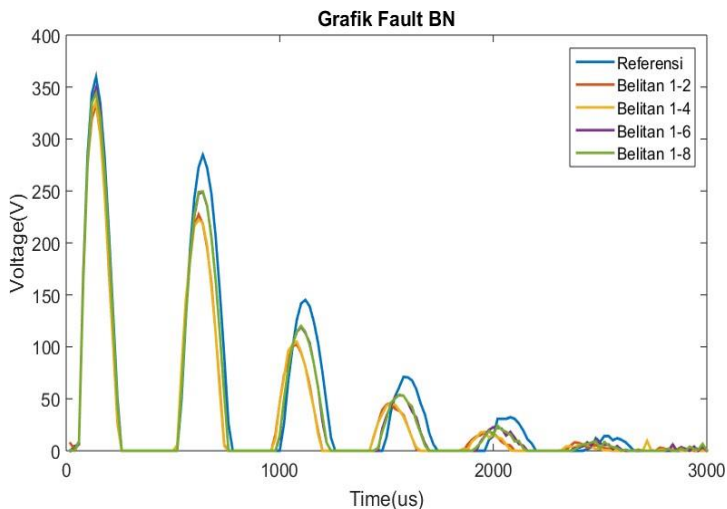
Hubung singkat	EAR Perhitungan	EAR Peralatan	Keterangan
Belitan 1-2	27.19	27.19	Terdeteksi
Belitan 1-4	27.28	27.28	Terdeteksi
Belitan 1-6	27.75	27.75	Terdeteksi
Belitan 1-8	27.92	27.92	Terdeteksi

Dari data diatas dapat kita lihat bahwa kondisi hubung singkat antar belitan memiliki nilai yang mirip. Nilai *threshold* yang didapat yaitu 1.49% yang berarti nilai yang melebihi 1.49% di diagnosa mengalami gangguan akibat hubung singkat antar belitan pada fasa A.

4.5.2 Hubung Singkat Antar Belitan Pada Fasa B

Pada pengujian ini dilakukan dengan skema hubung singkat pada belitan 1 dengan belitan 2, belitan 1 dengan belitan 4, belitan 1 dengan belitan 6, dan belitan 1 dengan belitan 8. Tujuan dilakukannya pengujian ini yaitu untuk mengetahui kerusakan yang ditimbulkan akibat hubung singkat pada antar belitan dalam satu fasa. Didapatkan nilai pengujian pada tiap kondisi hubung singkat yang kemudian dibandingkan dengan

nilai *threshold* pada kondisi normal. Sehingga menghasilkan nilai EAR pada kondisi hubung singkat.



Gambar 4. 6 Perbandingan gelombang referensi dan hubung singkat fasa B-N

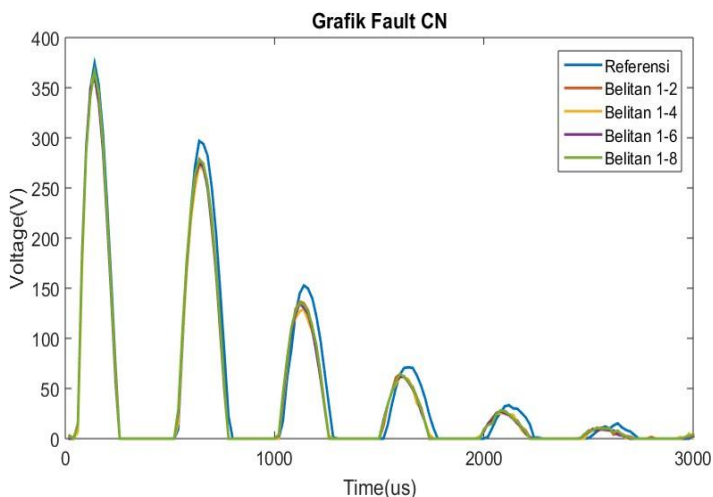
Tabel 4. 5 Hasil *Test-reff* EAR pengujian fasa B-N

Hubung singkat	EAR Perhitungan %	EAR Peralatan %	Keterangan
Belitan 1-2	37.46	37.46	Terdeteksi
Belitan 1-4	37.57	37.57	Terdeteksi
Belitan 1-6	19.23	19.23	Terdeteksi
Belitan 1-8	19.39	19.39	Terdeteksi

Dari data diatas dapat kita lihat bahwa kondisi hubung singkat antar belitan memiliki nilai yang variatif. Nilai *threshold* yang didapat yaitu 5.87% yang berarti nilai yang melebihi 5.87% di diagnosa mengalami gangguan akibat hubung singkat antar belitan pada fasa B.

4.5.3 Hubung Singkat Antar Belitan Pada Fasa C

Pada pengujian ini dilakukan dengan skema hubung singkat pada belitan 1 dengan belitan 2, belitan 1 dengan belitan 4, belitan 1 dengan belitan 6, dan belitan 1 dengan belitan 8. Tujuan dilakukannya pengujian ini yaitu untuk mengetahui kerusakan yang ditimbulkan akibat hubung singkat pada antar belitan dalam satu fasa. Didapatkan nilai pengujian pada tiap kondisi hubung singkat yang kemudian dibandingkan dengan nilai *threshold* pada kondisi normal. Sehingga menghasilkan nilai EAR pada kondisi hubung singkat.



Gambar 4.7 Perbandingan gelombang referensi dan hubung singkat fasa C-N

Tabel 4.6 Hasil *Test-refff* EAR tes surja fasa C-N

Hubung Singkat	EAR Perhitungan %	EAR Peralatan %	Keterangan
Belitan 1-2	14.39	14.39	Terdeteksi
Belitan 1-4	15.92	15.92	Terdeteksi
Belitan 1-6	16.51	16.51	Terdeteksi
Belitan 1-8	15.15	15.15	Terdeteksi

Dari data diatas dapat kita lihat bahwa kondisi hubung singkat antar belitan memiliki nilai yang variatif. Nilai *threshold* yang didapat yaitu 1.67% yang berarti nilai yang melebihi 1.67% di diagnosa mengalami gangguan akibat hubung singkat antar belitan pada fasa C.

4.5 Hasil dan Analisis Tes surja Kondisi Hubung singkat Antar Belitan Pada Fasa Yang Berbeda

Pengujian pada kondisi hubung singkat antar belitan dengan fasa yang berbeda dilakukan dengan skema pada bab 3. Dilakukan sebanyak 5 kali tiap percobaan, lalu dari 5 percobaan diambil nilai rata rata. Sehingga mendapatkan hasil yang akurat.

Pengujian surja dengan skema hubung singkat antar belitan dengan fasa yang berbeda ini berutujuan untuk mengetahui tingkat kerusakan yang ditimbulkan karena gangguan hubung singkat dengan fasa lainnya. Hasil dari pengujian ini juga digunakan sebagai nilai acuan pada pengujian motor BLDC dengan kondisi tertentu

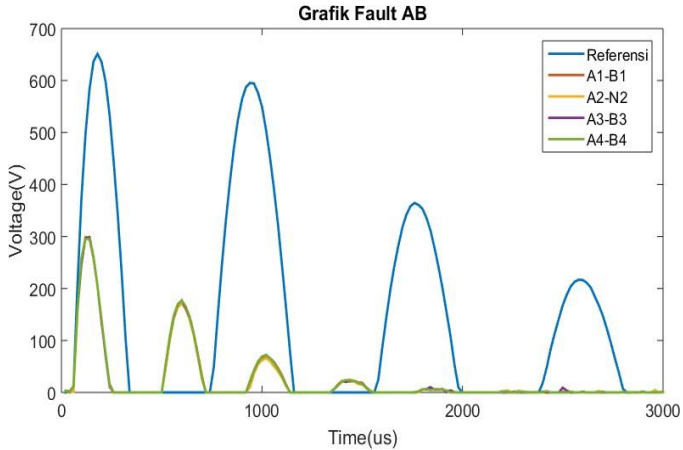


Gambar 4.8 Tes surja dengan hubung singkat antar belitan

4.6.1 Pengujian Pada Fasa A-B

Skema pengujian hubung singkat antar fasa dilakukan pada kondisi fasa yang saling berdekatan, karena hubung singkat akan terjadi pada belitan yang saling bersinggungan. Pengujian dilakukan pada fasa yang lokasinya saling berdekatan, seluruh fasa yang berdekatan pada

belitan ke 7, karena belitan ke 7 memiliki posisi terluar sehingga lebih mudah terjadi hubung singkat antar belitan dengan fasa sekitarnya.



Gambar 4.9 Perbandingan gelombang Referensi dengan hubung singkat A-B

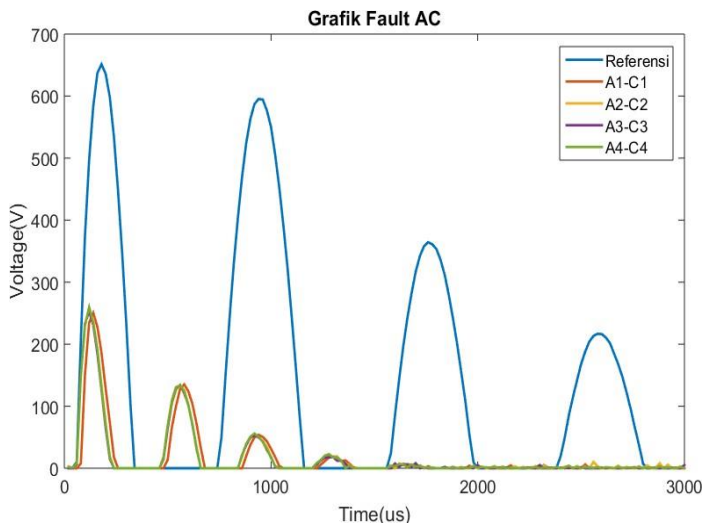
Tabel 4. 7 Hasil analisis tes surja antar fasa pada belitan 7

Hubung Singkat	EAR Perhitungan %	EAR Peralatan %	Keterangan
A1-B1	95.87	95.87	Terdeteksi
A2-B2	95.94	95.94	Terdeteksi
A3-B3	95.78	95.78	Terdeteksi
A4-B4	95.82	95.82	Tedeteksi

Dari data diatas dapat kita lihat bahwa kondisi hubung singkat antar belitan pada fasa AB memiliki nilai yang mirip. Nilai *threshold* yang didapat yaitu 0.76% yang berarti nilai yang melebihi 0.76% di diagnosa mengalami gangguan akibat hubung singkat antar belitan pada fasa AB

4.6.2 Pengujian Pada Fasa A-C

Skema pengujian hubung singkat antar fasa dilakukan pada kondisi fasa yang saling berdekatan, karena hubung singkat akan terjadi pada belitan yang saling bersinggungan. Pengujian dilakukan pada fasa yang lokasinya saling berdekatan, seluruh fasa yang berdekatan pada belitan ke 7, karena belitan ke 7 memiliki posisi terluar sehingga lebih mudah terjadi hubung singkat antar belitan dengan fasa sekitarnya.



Gambar 4. 10 Perbandingan gelombang Referensi dengan hubung singkat A-C

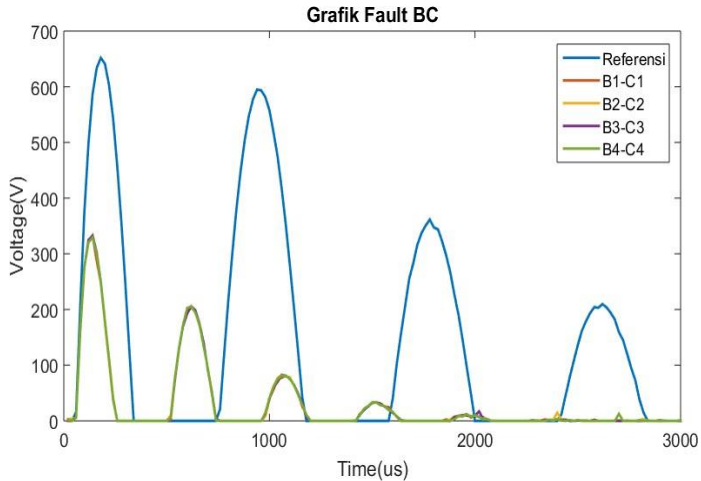
Tabel 4. 8 Hasil analisis tes surja antar fasa pada belitan 7

Hubung Singkat	EAR Perhitungan %	EAR Peralatan %	Keterangan
A1-C1	96.53	96.53	Terdeteksi
A2-C2	96.52	96.52	Terdeteksi
A3-C3	96.64	96.64	Terdeteksi
A4-C4	96.55	96.55	Terdeteksi

Dari data diatas dapat kita lihat bahwa kondisi hubung singkat antar belitan pada fasa AC memiliki nilai yang mirip. Nilai *threshold* yang didapat yaitu 0.75% yang berarti nilai yang melebihi 0.75% di diagnosa mengalami gangguan akibat hubung singkat antar belitan pada fasa AC

4.6.3 Pengujian Pada Fasa B-C

Skema pengujian hubung singkat antar fasa dilakukan pada kondisi fasa yang saling berdekatan, karena hubung singkat akan terjadi pada belitan yang saling bersinggungan. Pengujian dilakukan pada fasa yang lokasinya saling berdekatan, seluruh fasa yang berdekatan pada belitan ke 7, karena belitan ke 7 memiliki posisi terluar sehingga lebih mudah terjadi hubung singkat antar belitan dengan fasa sekitarnya.



Gambar 4. 11 Perbandingan gelombang Referensi dengan hubung singkat B-C

Tabel 4. 9 Hasil analisis tes surja antar fasa pada belitan 7

Hubung Singkat	EAR Perhitungan %	EAR Peralatan %	Keterangan
B1-C1	95.65	95.65	Terdeteksi
B2-C2	95.6	95.6	Terdeteksi
B3-C3	95.56	95.56	Terdeteksi
B4-C4	95.59	95.59	Terdeteksi

Dari data diatas dapat kita lihat bahwa kondisi hubung singkat antar belitan pada fasa BC memiliki nilai yang mirip. Nilai *threshold* yang didapat yaitu 0.65% yang berarti nilai yang melebihi 0.65% di diagnosa mengalami gangguan akibat hubung singkat antar belitan pada fasa BC.

4.6 Data *Threshold* Hasil Pengujian

Dari data pengujian yang dilakukan, didapatkan nilai *threshold* yang ada. Berikut adalah rangkuman data yang didapatkan:

Tabel 4. 10 Nilai *Threshold* Belitan Normal

Kondisi	Nilai <i>threshold</i> EAR (%)	
	Rekomendasi Baker	Nilai
Normal Coil		
<i>Test-reff</i> EAR Phase A-N Normal	10	1.49
<i>Test-reff</i> EAR Phase B-N Normal	10	5.87
<i>Test-reff</i> EAR Phase C-N Normal	10	1.67
<i>Test-reff</i> EAR Phase A-B Normal	15	0.76
<i>Test-reff</i> EAR Phase A-C Normal	15	0.75
<i>Test-reff</i> EAR Phase B-C Normal	15	0.65

Tabel 4. 11 Nilai *Threshold* Hubung Singkat

Kondisi	Nilai <i>threshold</i> EAR (%)				
	Rekomendasi Baker	Normal	<i>Min</i>	<i>Avg</i>	<i>Max</i>
<i>Test-reff</i> EAR <i>Phase A-N Fault</i>	10	1.49	27.19	27.53	27.92
<i>Test-reff</i> EAR <i>Phase B-N Fault</i>	10	5.87	19.23	28.41	37.57
<i>Test-reff</i> EAR <i>Phase C-N Fault</i>	10	1.67	14.39	15.49	16.51
<i>Test-reff</i> EAR <i>Phase A-B Fault</i>	15	0.76	95.82	95.85	95.94
<i>Test-reff</i> EAR <i>Phase A-C Fault</i>	15	0.75	96.52	96.56	96.64
<i>Test-reff</i> EAR <i>Phase B-C Fault</i>	15	0.65	95.56	95.56	95.65

Berdasarkan data pengujian yang telah dilakukan, nilai *threshold* dari kondisi gangguan dapat disusun sehingga menjadi sebuah data yang digunakan sebagai acuan untuk mendiagnosis saat melakukan tes surja pada motor BLDC.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan pada tugas akhir kali ini dapat ditarik beberapa kesimpulan. Berikut kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini:

1. Pada pengujian normal motor BLDC, nilai *threshold test-reff* EAR yang didapatkan dibawah 10% sehingga masih dalam kriteria *pass/fail* Baker
2. Pada kondisi motor BLDC *short* antar belitan fasa A-N, B-N, dan C-N nilai *threshold test-reff* EAR memiliki nilai maksimal 27,92%, 37,57%, dan 16,15%. Nilai *threshold test-reff* EAR melebihi kriteria *pass/fail* yang terindikasi terjadi gangguan akibat *short*.
3. Pada kondisi motor BLDC *short* antar belitan fasa A-B, A-C, dan B-C nilai *threshold test-reff* EAR memiliki nilai maksimal 95,94%, 96,64%, dan 96,65%. Nilai *threshold test-reff* EAR melebihi kriteria *pass/fail* yang terindikasi terjadi gangguan akibat *short*.
4. Nilai *test-reff* EAR pada motor BLDC lebih besar dari *threshold test-reff* EAR pada saat kondisi normal, maka belitan motor tersebut dikatakan terjadi hubung singkat antar belitan.
5. Terdapat perbedaan gelombang surja pada kondisi normal dan pada kondisi hubung singkat pada belitan. Pada kondisi gangguan, gelombang surja akan bergeser dibandingkan dengan kondisi normal.
6. Alat ini mampu mendeteksi kerusakan dengan cepat, karena mikrokontroler dapat menganalisa sinyal kerusakan yang dapat dilihat secara langsung pada layar LCD dan mampu menyimpan data pada *memory card*

5.2 Saran

Dalam tugas akhir masih ada yang dikebangkan untuk membantu penelitian untuk kedepannya. Berikut saran yang diharapkan oleh penulis:

1. Pengujian dilakukan dengan motor BLDC lain, sehingga dapat membandingkan kondisi motor BLDC yang diuji.
2. Menambahkan rangkaian pengondisian sinyal, sehingga data dapat terbaca secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Yedamale, “Brushless DC motor Fundamentals, Microchip Technology Application Note-AN885,” pp. 1–20, 2003.
- [2] S. Swarnakar, S. Mukhopadhyay, and D. Kasta, “Fault detection and remedial strategies for inter-turn short circuit faults in a permanent magnet brushless DC motor,” *Proc. INDICON 2005 An Int. Conf. IEEE India Counc.*, vol. 2005, pp. 492–496, 2005.
- [3] I. M. Y. Negara, P. Sakti, D. Fahmi, and D. A. Asfani, “Oscillating circuit design for inter-turn fault diagnostic in low-voltage induction motor,” *Proc. - 2014 Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2014*, pp. 1922–1926, 2014.
- [4] X. Huang, T. G. Habetler, R. G. Harley, and E. J. Wiedenbrug, “Using a surge tester to detect rotor eccentricity faults in induction motors,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 5, pp. 1183–1190, 2007.
- [5] S. Grubic, J. Restrepo, J. M. Aller, B. Lu, and T. G. Habetler, “A New Concept for Online Surge Testing for the Detection of Winding Insulation Deterioration in Low-Voltage Induction Machines,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 5, pp. 2051–2058, 2011.
- [6] Dhanang Tri Laksono, “Effect of Inter-Turn Fault Location on Single Phase Transformer to Transformer Impedance and Surge Test Performance,” Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.
- [7] L.-L. Ear dan T.-R. Ear, “Discussion of AWA Surge Test Pass/Fail Criteria,” hlm. 4.
- [8] I. M. Y. Negara, *Teknik Tegangan Tinggi - Prinsip dan Aplikasi Praktis*, 1 st. Graha Ilmu, 2013.
- [9] E. Machinery and P. Engineering, “IEEE Std 522-2004 (Revision of IEEE Std 522-1992),” *IEEE Std 522-2004 (Revision IEEE Std 522-1992)*, vol. 2004, no. August, p. 0_1-18, 2004.
- [10] E. M. Committee, “IEEE Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric,” vol. 1992, 1993

LAMPIRAN

List Program Mikrokontroler

```
#define ADC_SAMPLE_SIZE    10000    // freq_sample = 5000Hz

//parameter parameter yang bisa diganti
#define ADC_VREF            3.3f     //3.3Volt
#define ADC_RESOLUTION     12       // 12bit
#define ADC_FULL_SCALE     (1 << ADC_RESOLUTION)
#define ADC_HALF_SCALE     (ADC_FULL_SCALE >> 1)

#define V_REG                3.3
#define VIN_R1               10000.0
#define VIN_R2               4700.0
#define VOLTAGE_AMP_GAIN    200.0 // Verivolt2000:10
// Input voltage
#define GET_INPUT_VOLTAGE(adc_val)((V_REG / 4095.0) *
(float)adc_val * ((VIN_R1 + VIN_R2) / VIN_R2))

if(HAL_GPIO_ReadPin(Button_S2_GPIO_Port, Button_S2_Pin) ==
GPIO_PIN_RESET){
while(HAL_GPIO_ReadPin(Button_S2_GPIO_Port,
Button_S2_Pin) == GPIO_PIN_RESET);
HAL_Delay(250);
RELAY_ON(); //Charging Capacitor
ssd1306_Clear();
ssd1306_SetCursor(0,0);
ssd1306_WriteString("Charging CAP..",Font_7x10,White);
ssd1306_UpdateScreen();
HAL_Delay(5000);
RELAY_OFF(); //Matikan Relay
HAL_Delay(1); // Kasih Jeda Sebentar
ssd1306_Clear();
ssd1306_SetCursor(0,0);
ssd1306_WriteString("Discharging CAP",Font_7x10,White);
ssd1306_UpdateScreen();
Flag_ADC_Complete_Conversion = false;
```

```

//start timer2 Untuk Baca ADC
if(HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim2) != HAL_OK){
Error_Handler();
}
IGBT_ON(); //Discharging CAP
while(Flag_ADC_Complete_Conversion != true){
if(idx_dot >= 128) {idx_dot=0; ssd1306_Clear();}
ssd1306_SetCursor(idx_dot,12);
ssd1306_WriteChar('.',Font_7x10,White);
ssd1306_UpdateScreen();
idx_dot++;
HAL_Delay(50);
}
IGBT_OFF(); //Discharging CAP Selesai
for (i = 0; i < ADC_SAMPLE_SIZE; i++) {
signal_test[i]
GET_INPUT_VOLTAGE((float)uhADC1ConvertedValue[i])
VOLTAGE_AMP_GAIN;
}
//Simpan data hasil
sprintf(Buffer_Filename,"REFF_TEST_%02u_%02u_20%02u-
%02u_%02u_%02u.txt",date,month,year,hour,minute,second);
if(open_append(&LogFile, Buffer_Filename)!= FR_OK){
Error_Handler();
}
else{
for(int x=0; x< ADC_SAMPLE_SIZE; x++){
sprintf(Buffer_LCD,"%f;%f\n",fabs(signal_reff[x]),
fabs(signal_test[x]));
f_printf(&LogFile, Buffer_LCD);
}
f_close(&LogFile);
}

//Calculate EAR
float pembilang = 0.0, penyebut = 0.0;
for (i = 0; i < ADC_SAMPLE_SIZE; i++) {
if(fabs(signal_reff[i]) > 0.0){
pembilang += fabs(signal_reff[i] - signal_test[i]);
}
}

```

=
*

```

penyebut += fabs(signal_reff[i]);
ear_temp += fabs(signal_reff[i] - signal_test[i])/fabs(signal_reff[i]);
if(isnan(ear_temp)){
ssd1306_Clear();
ssd1306_SetCursor(0,0);
ssd1306_WriteString("Error",Font_7x10,White);
ssd1306_SetCursor(0,12);
sprintf(array, "at idx %d", i);
ssd1306_WriteString(array,Font_7x10, White);
ssd1306_UpdateScreen();
while(1);
}
}
}
EAR = (pembilang / penyebut);
ssd1306_Clear();
ssd1306_SetCursor(0,0);
ssd1306_WriteString("Success Calc EAR",Font_7x10,White);
ssd1306_SetCursor(0,12);
sprintf(array, "EAR: %f %%", EAR);
ssd1306_WriteString(array,Font_7x10, White);
ssd1306_UpdateScreen();
while(HAL_GPIO_ReadPin(Button_S2_GPIO_Port,
Button_S2_Pin) == GPIO_PIN_SET);
ssd1306_Clear();
}

```

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama Bernadictus Brian Kelvianto yang kerap dipanggil Vito. Lahir di Surabaya, 16 November 1996. Adik dari dua bersaudara. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SD Santa Clara Surabaya tahun 2009. Penulis juga telah menyelesaikan pendidikan SMP di SMP Negeri 1 Surabaya pada tahun 2012 dan pendidikan SMA di SMA Negeri 2 Surabaya pada tahun 2015. Penulis tengah melanjutkan studi kuliah di program S1 Teknik Elektro di bidang studi Sistem Tenaga,

Departemen Elektro, Fakultas Teknologi Elektro ITS Surabaya. Penulis mempunyai hobi bermain gitar, membaca buku, dan bermain futsal. Penulis dapat dihubungi melalui bernadictusvito@gmail.com