

Rekondisi Rumah dan Inti Stator Bekas dan Rekonstruksi Koil untuk Keterbentukan Struktur Belitan Stator Alternator Fase-tunggal

Marjuki

SMK Negeri 2 Kota Bogor, Jl.
Pangeran Sogiri no.404, Tanah Baru,
Bogor Utara, Kota Bogor 16154
email : marjuki@gmail.com

Alfian Hidayat

PT Melcoinda, Jl. Desa Sentul no.77,
RT001/RW05, Sentul, Babakan
Madang, Bogor 16811
email :
alfian.hidayat@gmail.com

Arief Goeritno

Program Studi Teknik Elektro,
Universitas Ibn Khaldun Bogor, Jln.
K.H. Sholeh Iskandar km.2, Kedung
Badak, Tanah Sareal, Kota Bogor
16162
email : arief.goeritno@uika-
bogor.c.id

Abstrak – Pekerjaan untuk perekondisian terhadap fisis rumah dan inti stator bekas dan perekonstruksian sejumlah koil dapat dilakukan untuk keterbentukan struktur belitan stator alternator fase-tunggal. Pekerjaan tersebut telah dilakukan guna pencapaian dua sasaran penelitian, yaitu (i) merekondisi fisis rumah dan inti stator bekas dan (ii) merekonstruksi sejumlah koil pada inti stator. Metode penelitian untuk pemenuhan tahapan rekondisi, meliputi pembersihan rumah dan inti stator bekas, penetapan alur-alur, penghitungan dan pembuatan untuk ketersediaan koil disesuaikan ke jumlah kutub dan tipe penggulangan koil, pemasangan struktur belitan stator, dan proses perhitungan dalam pembuatan koil. Pemenuhan tahapan rekonstruksi koil pada inti stator, meliputi pemasangan isolasi, pembuatan sejumlah koil sesuai penetapan jumlah kutub, pemasangan, penyambungan, dan pengikatan koil-koil, dan perhitungan nilai teoritis tegangan dan daya keluaran. Hasil rekondisi berupa tiga puluh enam alur dengan luas penampang masing-masing sebesar seratus mm² untuk dua ratus *enameled wire* berbentuk *round* terbuat dari tembaga, terbentuk delapan belas koil, sehingga terdapat 3.600 konduktor, panjang konduktor per koil dua puluh satu mm, sehingga diperlukan *round enameled copper wire* sepanjang 75.600 mm atau 75,6 meter, dan pembentukan tiga grup koil sebagai pedoman untuk rentang lebar magnet permanen. Hasil rekonstruksi berupa sebuah belitan stator berbentuk jerat (*buhul, lap winding*) terdiri atas enam grup koil, masing-masing grup terdiri atas tiga koil tersusun secara seri. Nilai tegangan keluaran alternator hasil perhitungan teoritis sebesar 170,2296 volt dan penetapan nilai frekuensi operasi sebesar 50 hertz, sedangkan nilai arus maksimum yang dapat dialirkan sebesar 0,477 ampere, maka diperoleh nilai daya maksimum sebesar 81,1995 volt-ampere. Secara keseluruhan dapat disimpulkan, bahwa hasil rekondisi dan rekonstruksi telah dihasilkan sebuah alternator fase-tunggal dengan tperkiraan daya sebesar 81 volt-ampere.

Kata kunci: Rekondisi rumah dan inti stator, rekonstruksi koil, struktur belitan stator, alternator fase-tunggal

Abstract -- Work on the physical conditioning of the used stator housing and core and the reconstruction of a number of coils can be carried out for the establishment of a single-phase alternator stator winding structure. This work has been carried out in order to achieve two research objectives, namely (i) to recondition the physical condition of the used stator housing and core and (ii) to reconstruct a number of coils in the stator core. The research method for fulfilling the reconditioning stages includes cleaning the used stator housing and core, determining grooves, calculating and manufacturing for coil availability adjusted to the number of poles and coil winding type, installing the stator winding structure, and the calculation process in coil manufacture. Fulfillment of the stages of reconstruction of the coil at the stator core, including the installation of insulation, manufacture of a number of coils according to the determination of the number of poles, installation, connection and bonding of the coils, and calculation of the theoretical value of the output voltage and power. The results of the reconditioning are thirty-six grooves with a cross-sectional area of one hundred mm² each for two hundred round enameled wires made of copper, eighteen coils are formed, so there are 3,600 conductors, the length of the conductor per coil is twenty one mm, so round enameled is required. copper wire 75,600 mm or 75.6 meters long, and the formation of three coil groups as a guide for the width range of permanent magnets. The result of the reconstruction is a stator winding in the form of a snare (*gusset, lap winding*) consisting of six groups of coils, each group consisting of three coils arranged in series. The output voltage value of the alternator as a result of theoretical calculations is 170.2296 volts and the operating frequency value is set at 50 hertz, while the maximum current that can flow is 0.477 amperes, so the maximum power value is 81.1995 volt-amperes. Overall it can be concluded that the results of the

reconditioning and reconstruction have resulted in a single-phase alternator with an estimated power of 81 volt-amperes.

Keywords: Stator housing and core reconditioning, coil reconstruction, stator winding structure, single-phase alternator

I. LATAR BELAKANG

listrik *ac* dengan sistem tegangan dan kapasitas tertentu [1]. Jumlah fase tegangan listrik terbangkitkan pun dapat berupa listrik arus bolak-balik (*abb, alternating current, ac*) fase-tunggal (*single-phase*) atau fase-banyak (*multi-phase*), sehingga dapat dipilih untuk keperluan tertentu yang bersesuaian dengan alternator fase-tunggal (*single-phase* atau 1Φ *alternator*) atau alternator fase-tiga (*three-phase* atau 3Φ *alternator*). Keberadaan alternator fase-banyak saat ini, didominasi oleh alternator dengan fase berjumlah tiga, sehingga dikenal dengan alternator fase-tiga. Kenyataan saat ini, alternator fase-tiga menjadi pilihan untuk pemberian daya di sistem fase-tiga dengan kemampuan daya dihasilkan jauh lebih besar, dimana salah satu fasenya digunakan untuk catu daya ke beban fase-tunggal [2].

Alternator fase-tunggal dikenal dengan ukuran kecil dan penggunaannya terbatas untuk catu daya siaga, jika catu daya utama terputus atau untuk pasokan daya yang bersifat sementara di lokasi pembangunan bangunan [3]. Untuk kasus-kasus tertentu, alternator fase-tunggal dengan kapasitas lebih besar, digunakan dalam aplikasi khusus, seperti tenaga traksi fase-tunggal untuk sistem elektrifikasi kereta api [4]. Salah satu alternatif untuk pemenuhan kebutuhan daya listrik dapat dilakukan melalui pembuatan atau modifikasi terpabrikasi sebuah generator listrik untuk produksi daya listrik dengan biaya sekecil mungkin dengan perawatan mudah dan berbiaya murah. Alternator hasil modifikasi terpabrikasi tanpa sikat atau komponen lain tetap perlu upaya perawatan [5]. Kelemahan utama alternator hasil modifikasi terpabrikasi, yaitu tegangan terbangkitkan relatif tidak konstan, karena ketiadaan pengontrolan untuk fluks magnet terbangkitkan atau gaya gerak magnet.

Pemanfaatan fisis stator bekas yang berasal dari motor induksi fase-tiga untuk dikondisikan sebagai stator alternator fase-tunggal modifikasi terpabrikasi dan pabrikasi struktur rotor sebagai elemen berputar pada alternator [6, 7, 8] yang dipasangi magnet permanen fluks radial, merupakan salah satu upaya untuk perolehan produksi daya listrik [9]. Stator bekas terdiri atas rumah stator dan inti stator. Rumah stator sebagai tempat untuk pemasangan inti stator, sedangkan inti stator dengan ketersediaan sejumlah alur untuk penempatan belitan stator. Kondisi berkarat pada inti stator bekas sebagai salah satu faktor

penyebab tingkat kinerja alternator hasil modifikasi terpabrikasi tidak maksimal [5].

Generator listrik beroperasi berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik pada jangkar (*armature*). Belitan stator ditempatkan pada alur-alur inti stator bersama-sama dengan inti stator secara keseluruhan, dikenal sebagai jangkar [6, 7, 8]. Inti stator berbentuk lingkaran dengan pola sambungan-sambungan pada rusuk, untuk keterjaminan generator terlindung dari getaran-getaran. Inti stator terbuat dari bahan feromagnetik atau besi lunak yang disusun berlapis-lapis tempat keterbentukan gaya gerak listrik [10, 6, 7, 8], sehingga dihasilkan daya keluaran dari sebuah generator listrik. Dalam hal konstruksi belitan stator, maka harus ditentukan terlebih dahulu alur-alur pada inti stator tempat belitan stator.

Belitan stator dikonstruksi dari *enameled wire* berbentuk *round* atau *rectangular* terbuat dari bahan tembaga atau aluminium dan tersusun dalam alur-alur secara cermat dan dengan perhitungan [6, 7, 8]. Hubungan luas penampang *enameled wire* berbentuk *round* dan kemampuan hantar arus [18], seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Hubungan luas penampang *enameled wire* berbentuk *round* dan kemampuan hantar arus

Luas penampang <i>enamelled wire</i> berbentuk <i>round</i> (mm ²)	Kemampuan Arus (ampere)
0,10	0,016-0,024
0,15	0,035-0,053
0,20	0,063-0,094
0,25	0,098-0,147
0,30	0,141-0,212
0,35	0,190-0,298
0,40	0,251-0,377
0,45	0,318-0,477
0,50	0,390-0,588
0,60	0,566-0,849
0,70	0,770-1,160
0,80	1,010-1,510
0,90	1,270-1,910
1,00	1,570-2,360
1,50	3,530-5,300

2,00	6,280-9,420
2,50	9,820-14,73
3,00	14,14-21,20
3,50	19,24-28,86
4,00	15,14-37,71

Pedoman pada Tabel 1 dapat digunakan sebagai acuan dalam pemilihan luas penampang *enameled wire* berbebtuk *round* untuk pembuatan koil [18]. Belitan stator modifikasi terpabrikasi dipasang secara erat pada inti stator sebagai hasil pabrikasi dari jumlah konduktor diputar dengan cepat di antara kutub magnet tipe tapal kuda (*horseshoe*). Untuk dihasilkan tegangan keluaran terbangkitkan dari belitan stator, maka rotor diputar pada kecepatan konstan untuk disesuaikan terhadap nilai frekuensi yang diinginkan [11]. Perubahan beban merupakan faktor penyebab perubahan nilai pada tegangan dan frekuensi.

Belitan stator hasil modifikasi terpabrikasi merupakan penentu seberapa besar daya keluaran, dipengaruhi oleh seberapa besar alur stator, jumlah alur, besar ukuran konduktor, dan bentuk sambungan belitan stator [12-16]. Keterkaitan dalam penentuan besar daya keluaran alternator modifikasi terpabrikasi [17], maka perlu dilakukan penelitian terkait dengan pengubahan rumah stator bekas dari motor induksi fase-tiga menjadi alternator fase-tunggal dengan tegangan dan frekuensi yang relatif konstan, walaupun beban alternator berubah-ubah [5]. Rotor pada alternator dirancang dengan pemasangan magnet permanen secara selang-seling dengan tipe kutub magnet berbeda, sesuai bentuk lingkaran [12-19].

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka ditentukan tujuan penelitian untuk pemenuhan pengubahan rumah stator bekas dari motor induksi fase-tiga menjadi alternator fase-tunggal yang meliputi merekondisi fisis rumah stator bekas dan merekonstruksi struktur belitan pada inti stator dan perhitungan nilai teoritis nilai tegangan dan daya keluaran. Pembentukan belitan stator, dipengaruhi oleh (i) jumlah alur pada stator, (ii) luas masing-masing alur, (iii) pemilihan luas penampang dan konduktor untuk pembuatan koil (dapat dipilih tipe (*RECW*, *round enameled copper wire*), (iv) tipe penggulangan koil, dan (v) penentuan jumlah kutub [6, 7, 8]. Penyesuaian terhadap struktur akhir belitan stator merupakan dasar untuk pabrikasi struktur rotor dengan magnet permanen fluks radial pada inti rotor yang didasarkan kepada dimensi dan nilai kerapatan fluks magnet yang tersedia di pasaran, jumlah magnet terpasang, dan penyusunan batang magnet pada inti rotor terkait dengan rentang lebar magnet [13-18].

II. METODE PENELITIAN

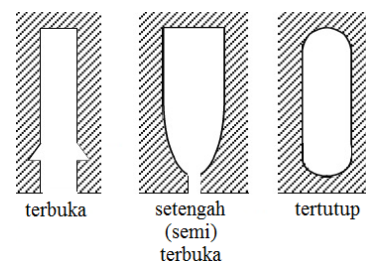
2.1 Bahan Penelitian

Bahan penelitian ditentukan dan dipilih berdasarkan hasil investigasi. Komponen-komponen yang digunakan dalam keterbentukan alternator fase-tunggal ini disesuaikan dengan keberadaan komponen di pasaran. Kebutuhan bahan untuk rekonstruksi struktur belitan stator, yaitu kawat email (*enameled wire*), kertas mika, tali pengikat, kabel penghubung, ampas, selongsong kabel. Penyertaan alat sebagai pendukung keberlangsungan pemasangan sejumlah komponen dalam penelitian ini, meliputi obeng, tang potong, solder, micrometer, gunting, dan multimeter.

2.1 Metode Penelitian

Penetapan metode penelitian didasarkan kepada tujuan penelitian terkait rekondisi dan rekonstruksi. Rekondisi terhadap fisis rumah stator bekas dilakukan dengan proses pengkondisian dan penggunaan sejumlah persamaan dalam pembuatan koil. Pengkondisian terhadap rumah dan inti stator, melalui (i) tahapan pembersihan rumah dan inti stator bekas dari kotoran dan karat, (ii) penetapan alur-alur pada inti stator, dan (iii) penggabungan kembali inti stator hasil rekondisi ke rumah stator. Penggunaan sejumlah persamaan untuk penghitungan material, agar terbentuk sejumlah koil.

Alur merupakan tempat perletakan koil untuk stator. Bentuk alur pada stator dibedakan ke dalam tiga tipe penampang, yaitu (i) bentuk terbuka, (ii) bentuk setengah terbuka, dan (iii) bentuk tertutup. Tipe penampang bentuk alur pada stator [20], seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



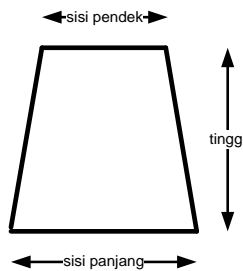
Gambar 1 Tipe penampang bentuk alur pada stator

Berdasarkan Gambar 1 ditunjukkan, bahwa berbagai tipe alur stator pada inti stator, yaitu tipe terbuka, setengah (semi) terbuka, dan tertutup. Perhitungan nilai luas alur tipe terbuka dan tertutup, dihitung dengan analogi luas persegi panjang, yaitu sisi panjang dikalikan sisi pendek (lebar), sedangkan untuk tipe setengah terbuka, penyelesaian terhadap luas alur didekati dengan penyelesaian terhadap bidang berbentuk trapesium sama kaki. Perhitungan luas

terhadap bentuk trapezium [21], digunakan persamaan (1).

$$LPABT = \frac{p_1+p_2}{2} \times t \quad (1),$$

dengan $LPABT$ = luas penampang alur, [mm²]; p_1 = sisi pendek, [mm]; p_2 = sisi panjang, [mm]; t = tinggi [mm]. Bentuk trapesium samakaki [10], seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Bentuk trapesium samakaki

Rekonstruksi belitan stator pada alur-alur inti stator dilakukan dengan tahapan, yaitu (i) proses konstruksi untuk pembentukan belitan stator dan (ii) ketersediaan sejumlah koil untuk pembentukan struktur stator hasil rekonstruksi dan perhitungan nilai teoritis tegangan dan daya. Pembentukan konstruksi belitan stator dengan urutan proses (i) pemasangan isolasi pada alur-alur di inti stator, (ii) pembuatan sejumlah koil (kumparan, *coil*) sesuai penetapan jumlah kutub, (iii) pemasangan koil pada alur-alur di inti stator, (iv) penyambungan koil-koil terpasang untuk keterbentukan kondisi akhir sebuah belitan, dan (v) pengikatan terhadap sejumlah koil untuk kerapian struktur akhir sebuah belitan stator. Sejumlah koil untuk struktur akhir belitan stator melalui (i) sejumlah proses konstruksi untuk pembentukan belitan stator dan (ii) struktur stator hasil rekonstruksi dan penghitungan nilai teoritis tegangan dan daya.

Perhitungan untuk penentuan jumlah koil guna pembentukan belitan stator [6, 7, 8, 13, 18, 19], melalui (i) kelompok konduktor (jumlah lintasan konduktor) per alur, (ii) pemberian toleransi, (iii) jumlah koil, (iv) kelompok konduktor (jumlah konduktor per alur) pada seluruh alur, (iv) panjang kawat, (v) jumlah grup kumparan, dan (vi) jumlah kumparan per grup.

#i) Jumlah lintasan konduktor (jumlah konduktor) per alur, dihitung dengan persamaan (2).

$$\sum_{kond_per_alur} = \frac{luas\ penampang\ alur}{luas\ penampang\ kawat} \quad (2).$$

#ii) Penetapan toleransi sebesar 10% untuk pasak dan dapat dihitung dengan persamaan (3).

$$\phi_{pasak} = \sum_{kond_per_alur} \cdot 10\% \quad (3).$$

#iii) Jumlah koil, ditentukan berdasarkan penggunaan alur untuk keterbentukan sebuah koil. Untuk keterbentukan sebuah koil dibutuhkan dua alur, sehingga penentuan jumlah koil digunakan persamaan (4) [6, 7, 8, 13, 18, 19].

$$\sum_{koil} = \frac{\sum_{alur}}{2} \quad (4).$$

#iv) Jumlah konduktor pada seluruh alur tersedia, digunakan persamaan (5).

$$\sum_{kond} = \frac{kond_per_alur \cdot \sum_{alur}}{2} \quad (5).$$

#iv) Panjang *enameled wire* untuk koil dihitung dengan persamaan (6).

$$L_{kond_total} = L_{kond_per_koil} \cdot \sum_{kond} \quad (6).$$

#v) Jumlah grup koil dihitung dengan persamaan (7).

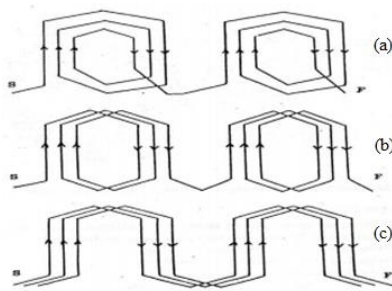
$$\sum_{grup_koil} = \sum_{fase} \cdot p \cdot lk \quad (7).$$

dengan p = jumlah kutub; lk = langkah.

#vi) Jumlah koil per grup dihitung dengan persamaan (8).

$$\frac{\sum_{koil}}{grup} = \left(\frac{\sum_{alur}}{\sum_{grup_koil}} \right) \cdot lk \quad (8).$$

Koil pada inti stator dapat dirangkai dalam 2 jenis, yaitu: kumparan satu lapis (*single layer winding*) dan kumparan dua lapis (*double layer winding*). Koil dengan satu lapis dibedakan dalam 3 macam bentuk, yaitu: (a) mata rantai (memusat, *concentric, spiral winding*), (b) jerat (buhul, *lap winding*), dan (c) gelombang (*wave winding*). Kumparan dua lapis dibedakan dalam 2 macam bentuk, yaitu: (a) jenis gelombang (*wave*) dan (b) jenis gelung (*lap*). Bentuk koil satu lapis untuk pemasangan pada alur di inti stator yang disesuaikan terhadap lebar rentang kutub magnet pada rotor [20], seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



(a) mata rantai (memusat, *concentric, spiral winding*), (b) jerat (buhul, *lap winding*), dan (c) gelombang (*wave winding*)

Gambar 3 Bentuk koil satu lapis untuk pemasangan pada alur di inti stator yang disesuaikan terhadap lebar rentang kutub magnet pada rotor

Penentuan nilai tegangan teoritis untuk sebuah koil digunakan persamaan (9) [6, 7, 8, 13, 18, 19].

$$E_{koil} = 4,44 \cdot N_{kond.} \cdot f \cdot \Theta_{maks.} \quad (9).$$

Nilai fluks magnet maksimum ($\Theta_{maks.}$) diambil dari nilai hasil perhitungan setelah batang magnet permanen dipabrikasi, sebesar 0,000213 weber [18]. Perhitungan nilai daya maksimum, digunakan persamaan (10) [6, 7, 8, 18, 19].

$$S = V \cdot I \quad (10).$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Fisis Rumah dan Inti Stator Bekas setelah Rekondisi

Rekondisi fisis rumah stator bekas diperoleh setelah pengkondisian rumah dan inti stator dan implementasi sejumlah persamaan untuk melalui beberapa tahapan proses pengerjaan pembersihan rumah dan inti rumah stator bekas dari kotoran dan karat, ditindaklanjuti dengan tahapan penetapan alur stator, penggabungan kembali inti stator ke rumah stator, dan penghitungan untuk ketersediaan koil, sebagai pembentuk belita stator.

3.1.1 Rekondisi rumah dan inti stator

Dalam rekondisi terhadap rangka rumah stator terdapat 2 bagian penting, yaitu rangka rumah stator dan inti stator dengan sejumlah alur untuk penempatan konstruksi belitan stator. Sebelum rekondisi, bentuk rumah dan inti stator masih dalam kondisi baik. Hasil rekondisi rumah dan inti stator, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



#a) rumah stator #b) inti stator dengan sejumlah alur

Gambar 4 Hasil rekondisi rumah dan inti stator

Berdasarkan Gambar 4 ditunjukkan, bahwa rumah stator terbuat dari bahan besi cor, sedangkan inti stator terbuat dari bahan besi dan tersusun dari beberapa lembaran besi tipis hingga tersusun rapi, agar dapat diperoleh tegangan induksi do belitan melalui pengaliran fluks magnet secara baik, karena fluks magnet terbentuk di sekitar inti stator dan tidak terjadi panas. Untuk kondisi dimana penggunaan bahan besi pejal, sehingga kerapatan fluks magnitnya kurang baik. Kondisi rumah stator harus dalam keadaan baik tidak ada karat atau korosi, agar berkinerja maksimum dalam produksi daya melalui pembangkitan tegangan listrik.

Penggabungan terhadap rumah dan inti stator harus hati-hati, agar tidak terjadi kerusakan pada inti stator, karena inti stator terbuat dari lembaran besi tipis. Penggabungan rumah dan inti stator, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



#i) sebelum penggabungan #ii) setelah penggabungan

Gambar 5 Penggabungan rumah dan inti stator

Berdasarkan Gambar 5 ditunjukkan, bahwa pemasangan terintegrasi inti stator pada rumah stator dilakukan dengan bantuan enam buah sekrup, sedangkan alur-alur pada inti stator berjumlah tiga puluh enam dengan luas penampang sebesar 100 mm². Jumlah alur pada inti stator merupakan kondisi untuk keterbentukan kelompok koil bagian dari belitan stator

yang berhubungan dengan jumlah kutub yang dapat dihasilkan.

3.1.2 Sejumlah proses perhitungan dalam pembuatan koil

Berdasarkan jumlah alur keseluruhan yang terkondisikan sebanyak tiga puluh enam dan dapat dihasilkan jumlah kutub yang sebanding, agar tegangan terbangkitkan dapat semaksimal mungkin dengan kecepatan putaran tidak terlalu besar untuk pencapaian nilai frekuensi komersial. Alur berbentuk setengah (semi) terbuka serupa dengan bentuk trapezium berdimensi 4 mm, 6 mm, dan 20 mm. Penghitungan untuk luas penampang alur, digunakan persamaan (1), sehingga diperoleh nilai luas alur untuk lintasan konduktor atau jumlah konduktor per alur:

$$LPABT = \left(\frac{p_1 + p_2}{2} \right) \cdot t = \left(\frac{6 + 4}{2} \right) \cdot 20 = 100 \text{ mm}^2.$$

Penggunaan LPABT terhitung sebesar 100 mm², maka dihitung jumlah lintasan konduktor per alur sesuai persamaan (2), sehingga diperoleh $\sum_{kond.per.alur} = \frac{100 \text{ mm}^2}{0,45 \text{ mm}^2} = 222,22$ lintasan konduktor per alur. Jumlah lintasan konduktor per alur sebanyak 222,2 lilit, dikurangi 10% untuk penempatan pasak, agar tidak terjadi penonjolan kawat yang dapat berakibat konduktor tersebut putus oleh rotor yang berputar, maka dihitung nilai toleransi dengan persamaan (3), sehingga diperoleh $\phi_{pasak} = \frac{222,22}{100} \times 10 = 22,22$ lintasan konduktor atau jumlah konduktor per alur. Jumlah konduktor per alur sebelumnya 222,22 menjadi 200, karena dikurangi toleransi sebesar sepuluh persen (10%) untuk pasak sebanyak 22,22 lilitan. Untuk penentuan jumlah koil setelah diketahui konduktor per alur sebanyak 200 lilitan dan jumlah alur 36 alur, maka penentuan jumlah koil keseluruhan dihitung dengan persamaan (4), sehingga diperoleh $\sum_{koil} = \frac{36}{2} = 18$. Jumlah koil diperoleh sebanyak 18 buah, maka jumlah konduktor pada seluruh alur dihitung dengan persamaan (5), sehingga diperoleh jumlah lintasan konduktor untuk seluruh alur, yaitu $\sum_{kond.} = \frac{200 \cdot 36}{2} = 3.600$ konduktor pada penggunaan seluruh alur (36 alur).

Panjang konduktor per koil sebesar 21 mm, sehingga panjang penggunaan *enameled wire* berbentuk round berbahan tembaga (*copper*), dihitung dengan persamaan (6), yaitu:

$$L_{kond.total} = 21 \times 3.600 = 75.600 \text{ mm atau } 75,6 \text{ m.}$$

Jumlah grup kumparan dihitung dengan persamaan (7), sehingga diperoleh $\sum_{grup.koil} = 1 \cdot 12 \cdot \frac{1}{2} = 6$.

Jumlah koil per grup dihitung dengan persamaan (8), yaitu

$$\frac{\sum_{koil}}{grup} = \left(\frac{36}{6} \right) \cdot \frac{1}{2} = 3, \text{ sehingga diperoleh 3 koil per grup.}$$

B. 3.2 Struktur Belitan Stator Terkonstruksi

Struktur belitan stator terkonstruksi diperoleh setelah melalui (i) sejumlah proses konstruksi untuk pembentukan belitan stator dan (ii) struktur stator hasil rekonstruksi dan nilai teoritis tegangan dan daya hasil perhitungan.

3.2.1 Sejumlah proses konstruksi untuk pembentukan belitan stator

Sejumlah proses konstruksi untuk keterbentukan struktur belitan stator, dilakukan dengan beberapa tahapan-tahapan, yaitu a) pemasangan isolasi pada alur-alur di inti stator, b) pembuatan sejumlah koil (kumparan, *coil*) sesuai penetapan jumlah kutub, c) pemasangan koil pada alur-alur di inti stator, d) penyambungan koil-koil terpasang untuk keterbentukan kondisi akhir sebuah belitan, dan e) pengikatan terhadap sejumlah koil untuk kerapian struktur akhir sebuah belitan stator.

#a) Pemasangan isolasi pada alur-alur di inti stator

Pemasangan isolasi pada alur-alur di inti stator, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Pemasangan isolasi pada alur-alur di inti stator

Berdasarkan Gambar 6 dapat dijelaskan, bahwa pemasangan isolasi yang terbuat dari kertas berbahan mika merupakan upaya untuk pengamanan belitan dari kondisi hubung singkat pada inti stator dan difungsikan sebagai isolasi ganda pada inti stator, agar tidak terjadi induksi pada rumah stator.

#b) Pembuatan belitan

Proses pembuatan belitan stator dilakukan melalui penggulangan kawat tembaga berbentuk silinder terisolasi enamel (*enameled round copper wire*) berpedoman kepada lebar setiap kutub dan bentuk gulungan belitan untuk pencapaian kondisi maksimum tegangan yang terbangkitkan. Tampilan penggulangan *enameled round copper wire*, seperti ditunjukkan pada Gambar 7.

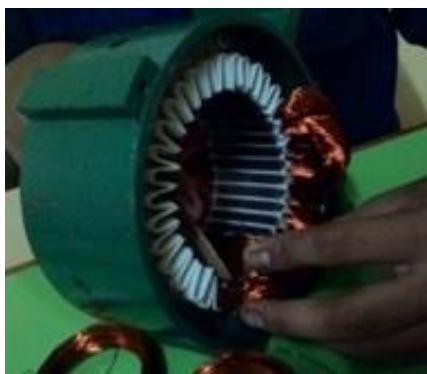


Gambar 7 Tampilan penggulangan ERCW

Penggulangan ERCW melalui perpolaan, agar belitan dapat tersusun rapih dalam pemasangan di inti stator dan diukur terlebih dahulu, agar tidak terjadi penumpukan pada stator. Pemilihan ERCW berukuran 0.45 dan diameter alur berukuran 100 mm, maka diperoleh 200 lintasan konduktor per alur dengan penyisaan celah selebar 10 mm untuk pemasangan pasak, agar tidak terjadi penonjolan kawat yang dapat berakibat konduktor terputus oleh rotor saat berputar.

#c) Pemasangan sejumlah coil pada alur-alur di inti stator

Tampilan pemasangan belitan pada alur-alur di inti stator, seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Tampilan pemasangan sejumlah coil pada alur-alur di inti stator

Berdasarkan Gambar 8 dapat dijelaskan, bahwa pemasangan sejumlah coil pada alur-alur di inti stator dilakukan secara hati-hati, agar tidak terjadi goresan

pada coil terpasang yang dapat berakibat timbul induksi tegangan. Pemasangan terhadap sejumlah coil digunakan sasak, agar coil-coil tersusun rapi pada alur-alur di inti stator.

#d) Penyambungan coil-coil terpasang untuk keterbentukan kondisi akhir sebuah belitan

Tampilan saat penyambungan coil-coil terpasang untuk keterbentukan kondisi akhir sebuah belitan, seperti ditunjukkan pada Gambar 9.

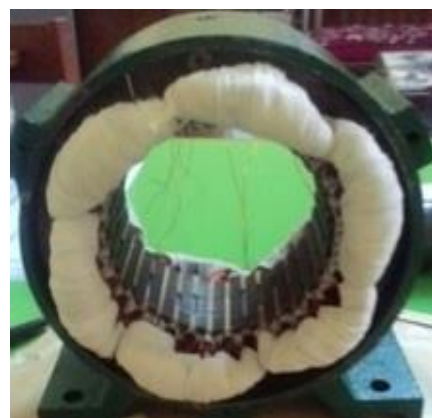


Gambar 9 Tampilan saat penyambungan coil-coil terpasang untuk keterbentukan kondisi akhir sebuah belitan

Berdasarkan Gambar 9 ditunjukkan, bahwa penyambungan sejumlah coil diperlukan untuk penentuan seberapa banyak jumlah kutub yang dapat dibuat untuk pembangkitan tegangan listrik.

#e) Pengikatan terhadap sejumlah coil untuk kerapian struktur akhir sebuah belitan

Proses pengikatan terhadap sejumlah coil dilakukan, agar diperoleh kerapian struktur akhir sebuah belitan. Tampilan hasil dari proses pengikatan terhadap coil-coil terpasang, seperti ditunjukkan pada Gambar 10.

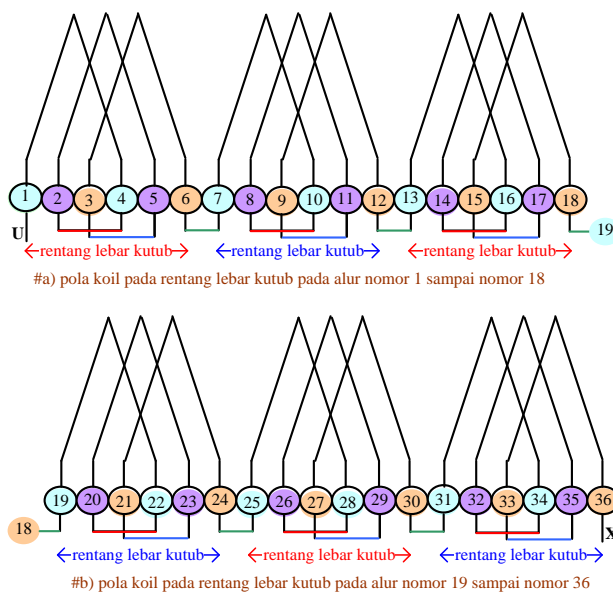


Gambar 10 Tampilan hasil dari proses pengikatan terhadap koil-koil terpasang

Berdasarkan Gambar 10 dapat dijelaskan, bahwa pengikatan terhadap koil-koil terpasang digunakan tali, agar terlihat lebih rapi dan sebagai upaya untuk penghindaran dari potensi gesekan secara langsung terhadap *round enameled copper wire* saat dilakukan pemasangan tutup stator.

3.2.2 Struktur stator hasil konstruksi dan nilai teoritis tegangan dan daya hasil perhitungan

Ketersediaan jumlah alur pada inti stator hasil rekondisi, pemilihan terhadap ukuran *ERCW*, keterbentukan sejumlah koil hasil perhitungan, dan pilihan terhadap penyambungan koil dalam penyesuaian terhadap posisi kutub, maka ditentukan cara penyambungan terhadap keberadaan koil. Diagram skematis penyambungan antar koil terpabrikasi untuk struktur belitan stator, seperti ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11 Diagram skematis penyambungan antar koil terpabrikasi untuk struktur belitan stator

Berdasarkan Gambar 11 dapat dijelaskan, bahwa belitan stator terkonstruksi terbentuk dalam 6 grup koil dan masing-masing grup koil terdiri atas tiga koil yang digulung dalam satu lapis secara jerat (*buhul, lap winding*), keseluruhan tersusun secara seri untuk perolehan tegangan dan daya optimum.

Bentuk akhir struktur belitan stator tersebut didasarkan kepada ketersediaan alur berjumlah 36,

setiap alur diisi oleh satu ikat kelompok konduktor berjumlah 200 kawat, bentuk belitan sesuai pola *lap winding* dengan kutub berjumlah 6 buah, karena satu grup koil pada rentang lebar magnet permanen. Nilai tegangan keluaran diasumsikan dengan frekuensi operasi sebesar 50 hertz, maka diperoleh hasil perhitungan dengan persamaan (9). Data jumlah lintasan konduktor pada 36 alur sebesar 3600, fluks magnet maksimum ($\Theta_{maks.}$) sebesar 0,000213 weber, jumlah koil stator (N_k) berjumlah 18 dan fase berjumlah 1, maka dihitung secara bertahap:

#a) tegangan per koil; 1 koil dengan 200 konduktor.

$$E_{koil} = 4,44 \cdot 50 \cdot 200 \cdot 0,000213 = 9,4572 \text{ volt.}$$

#b) tegangan per grup koil; 1 grup koil dengan 600 konduktor.

$$E_{grup_koil} = 4,44 \cdot 50 \cdot 600 \cdot 0,000213 = 28,3716 \text{ volt.}$$

#c) tegangan belitan stator; pembentukan belitan stator terdiri atas 6 grup koil terhubung secara seri.

$$E_{belitan} = E_{grup_koil} \cdot 6 = 28,3716 \cdot 6 = 170,2296 \text{ volt.}$$

Setelah dilakukan perhitungan dengan diperoleh nilai tegangan keluaran alternator sebesar 170,2296 volt dan frekuensi operasi pada nilai 50 hertz, sedangkan nilai arus maksimum yang dialirkan pada *round enameled round copper wire* berdiameter 0,45 mm, diperoleh sesuai tabel sebesar 0,477 ampere, maka daya dihitung dengan persamaan (10) dan diperoleh nilai daya maksimum sebesar $170,2296465 \cdot 0,477 = 81,1995 \text{ VA}$.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan bahasan, maka ditarik kesimpulan sesuai tujuan penelitian. Hasil rekondisi berupa tiga puluh enam alur dengan luas penampang masing-masing sebesar seratus mm^2 untuk dua ratus *enameled wire* berbentuk *round* terbuat dari tembaga, terbentuk delapan belas koil, sehingga terdapat 3.600 konduktor, panjang konduktor per koil dua puluh satu mm, sehingga diperlukan *round enameled copper wire* sepanjang 75.600 mm atau 75,6 meter, dan pembentukan tiga grup koil sebagai pedoman untuk rentang lebar magnet permanen.

Hasil rekonstruksi berupa sebuah belitan stator berbentuk jerat (*buhul, lap winding*) terdiri atas enam grup koil, masing-masing grup terdiri atas tiga koil tersusun secara seri. Nilai tegangan keluaran alternator hasil perhitungan teoritis sebesar 170,2296 volt dan penetapan nilai frekuensi operasi sebesar 50 hertz, sedangkan nilai arus maksimum yang dapat dialirkan sebesar 0,477 ampere, maka diperoleh nilai daya maksimum sebesar 81,1995 volt-ampere.

V. REFERENSI

- [1] S. Aylmer-Small, "Lesson 28: Alternators," *Electrical railroading; or, Electricity as applied to railroad transportation*. Chicago: Frederick J. Drake & Co., 1908, pp. 456–463.
- [2] United State Navy, *Navy Electricity and Electronics Training Series: Module 5—Introduction to Generators and Motors (NAVEDTRA 14177)*. Great Lake, IL: Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, 1998, pp. 3-7, 3-8, and 3-15.
- [3] M.E. Brumbach. *Industrial Electricity* (8th ed.). Clifton Park, NY: Delmar, 2010, p. 418.
- [4] Official Assessment E.ON Kraftwerke GmbH, *Hydropower Sustainability Assessment Tool*. Kochel am See, Germany: Walchenseekraftwerk, 2012, pp. 2.
- [5] S. Yahya dan T. Tohir. "Motor Induksi Split Phase sebagai Generator Induksi Satu Fasa," in *Seminar Nasional Teknoin 2008 Bidang Teknik Elektro*, Sleman, YO, 2008, pp. E83-E88.
- [6] A.E. Fitzgerald, C. Kingsley, Jr., and S.D. Umans, *Electric Machinery*. New York: McGraw-Hill, 2003, pp. 2-37.
- [7] T. Wildi, *Electrical Machines, Drive, and Power Systems*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2006, pp. 3-36.
- [8] S. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*. New York, NY: McGraw-Hill, 2012, pp. 4-11.
- [9] N.P.A. Smith. *Motor as Generators for Micro-hydro Power*. Rugby, Warks: Intermediate Technology Development Group (ITDG), 2001, pp. 39-41.
- [10] G.R. Selmon, *Magnetolectric Devices*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 1966, pp. 391-393.
- [11] T. Chalko, Tom, *Optimizing a Permanent Magnet Alternator for Micro-hydro Application*. Mt. Best, Australia: Scientific E Research, 2005, pp. 1-6.
- [12] J.S. Hsu, *Flux Guides for Permanent-Magnet Machines*. City of Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 1998, pp. 1-7.
- [13] A. von-Meier, *Electric Power Systems: A Conceptual Introduction*. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2006, pp. 96-97.
- [14] A. Aleksashkin and A. Mikkola, "Literature Review on Permanent Magnet Generators Design and Dynamic Behavior," *Research Report 77, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology*. Lappeenranta (Finland): Lappeenranta University of Technology 2008, pp. 20-56.
- [15] T.D. Strous, "Design of a Permanent Magnet Radial Flux Concentrated Coil Generator for a Range Extender Application," MSc. Thesis Report, EEC, TU Delft, Delft, ZH, 2010 (pp. 12-22).
- [16] K. Erol, H. Gör, M. Demirtas. (2014, January). Theoretical and experimental analyses of a single phase permanent magnet generator (PMG) with multiple cores having axial and radial directed fluxes. *Energy Conversion and Management*. [Online]. 77, pp. 163–172.
- [17] E.A. Putra. "Perancangan dan Pembuatan Generator Fluks Radial Satu Fasa Menggunakan Belitan Kawat Sepeda Motor Dengan Variasi Diameter Kawat," Skripsi S1, PSTE, Univ. Bengkulu, Kota Bengkulu, BE, 2015.
- [18] Marjuki. "Konstruksi Belitan Stator Fase-Tunggal untuk Alternator Magnet Permanen Fluks Radial," Skripsi S1, PSTE, UIKA Bogor, Kota Bogor, JB, 2016.
- [19] A. Goeritno, Marjuki, dan A. Hidayat. (2016, November). Struktur Belitan Stator dan Rotor Bermagnet Permanen Fluks Radial untuk Alternator Fase-tunggal. Seminar Nasional Sains dan Teknologi (Semnastek) 2016.
- [20] A. Maulidi. *Bahan Ajar Electronic Engine (Kode: 703338A)*. Sampang, JI: Politeknik Negeri Madura (POLTERA), 2014.
- [21] A.D. Gardiner and C.J. Bradley. *Plane Euclidean Geometry: Theory and Problems*. City of Leeds, YSW: UKMT, 2005, p. 34.