

## STRUKTUR BELITAN STATOR DAN ROTOR BERMAGNET PERMANEN FLUKS RADIAL UNTUK ALTERNATOR FASE TUNGGAL

Arief Goeritno<sup>1</sup>, Marjuki<sup>2</sup>, Alfian Hidayat<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dosen Tetap Jurusan/Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Ibn Khaldun Bogor  
Jl. K.H. Sholeh Iskandar km.2 Kedung Badak, Tanah Sareal, Kota Bogor 16132, Telepon: 0251-8356884

<sup>2</sup>SMK Negeri 2 Kota Bogor

Jl. Pangeran Sogiri no. 404, Tanah Baru, Bogor Utara, Kota Bogor 16154 Telepon: 0251-8659385/8652085

<sup>3</sup>PT Melcoinda

Jl. Desa Sentul no. 77 RT001/RW05, Sentul, Babakan Madang, Kabupaten Bogor 16811

\*E-mail : arief.goeritno@ft.uika-bogor.ac.id

### ABSTRAK

Pemanfaatan kembali rangka dan inti stator bekas dari motor induksi fase-tiga ( $3\Phi$ ) melalui pengkondisian ulang terhadap rangka dan inti stator untuk perolehan alternator fase-tunggal. Pengkondisian ulang terhadap inti stator digunakan untuk pembentukan belitan stator pada inti stator. Pembentukan belitan stator dipengaruhi oleh jumlah alur pada stator, luas masing-masing alur, pemilihan luas penampang dan tipe kawat *email* untuk kumparan, dan cara penggulangan kumparan dan penentuan jumlah kutub. Struktur belitan stator digunakan untuk pabrikasi struktur rotor dengan magnet permanen fluks radial. Keberadaan struktur belitan stator dan rotor dengan magnet permanen fluks radial pada alternator fase-tunggal digunakan sebagai dasar perhitungan untuk perolehan daya listrik teoritis yang dihasilkan alternator fase-tunggal. Keberadaan struktur rotor dengan magnet permanen fluks radial pada alternator fase-tunggal digunakan sebagai dasar perhitungan daya mekanis teoritis yang diperlukan dari penggerak mula. Struktur belitan stator terbentuk oleh enam grup kumparan (koil) tipe jerat (*lap winding*) satu lapis pada rentang 6 (enam) aluran yang terhubung seri. Struktur rotor berbentuk silinder berongga berdimensi 60 mm, 30 mm, dan 85 mm yang dilengkapi dengan 12 buah magnet permanen. Nilai daya listrik teoritis yang dihasilkan alternator sebesar 81 VA, sedangkan daya mekanis teoritis yang diperlukan dari penggerak mula sebesar 350 watt.

**Kata-kata Kunci:** alternator fase-tunggal, belitan stator, rotor magnet permanen fluks radial

### ABSTRACT

*Abstrak Reutilization of the former of frame and stator core form three-phase induction motor ( $3\Phi$ ) through reconditioning the frame and stator core to obtaining the single-phase alternator. Reconditioning the stator core to be used for the formation of stator winding on the stator core. Stator winding formation is influenced by number of slots on the stator, the area of each slot, the selection of cross-sectional area and type of the enamelled wire for coils, and coils winding way and determination of number of the poles. Stator winding structure used for fabricating structure of the rotor with radial flux permanent magnet. Availability of structures of the stator winding and the rotor with radial flux permanent magnets on the single-phase alternator is used as the basis for calculation of obtaining the theoretical electrical power that generated by the single-phase alternator. Availability of the rotor structure with radial flux permanent magnets on the single-phase alternator is used as the basis for calculation of obtaining the theoretical mechanical power that required from the prime mover. The stator winding structure is formed by six groups of the coils with lap winding type on one layer in the range of 6 (six) slots that connected in series. The rotor structure is cylindrical hollow with dimensions 60 mm, 30 mm, and 85 mm that equipped with 12 pieces of permanent magnet. The value of theoretical electrical power that generated by the alternator is 81 VA, while the value of theoretical mechanical power that required from the prime mover is 350 watts.*

**Keywords:** single phase alternator, stator winding, rotor with radial flux permanent magnet.

## PENDAHULUAN

Rangka (rumah) dan inti stator pada motor induksi fase-tiga (3Φ) sebagai material bekas dapat dimanfaatkan kembali untuk perolehan tenaga (daya) listrik melalui alternator fase-tunggal (Smith, 2001). Rangka stator sebagai tempat keberadaan inti stator (Fitzgerald, 2002; Wildi, 2006; Chapman, 2012). Inti stator untuk penempatan belitan stator pada proses pembangkitan tegangan listrik pada alternator fase-tunggal maupun fase-tiga (Fitzgerald, 2002; Chapman, 2012). Pemanfaatan kembali rangka dan inti stator bekas berupa tahapan-tahapan pengkondisian ulang terhadap rangka dan inti stator, pembentukan belitan stator, dan pabrikan struktur rotor bermagnet permanen fluks radial (Smith, 2001). Rotor merupakan elemen berputar pada alternator (Fitzgerald, 2002; Wildi, 2006; Chapman, 2012). Rotor dengan magnet permanen merupakan bagian dari generator yang tersusun secara berselang-seling dengan kutub berbeda-beda dari sejumlah magnet mengikuti bentuk lingkaran (Hsu, 1998; Meier, 2006; Aleksashkin, 2008; Strous, 2010; Erol, 2014).

Pembentukan belitan stator, dipengaruhi oleh jumlah alur pada stator, luas masing-masing alur, pemilihan luas penampang dan tipe kawat *email* untuk kumparan, tipe penggulangan kumparan dan penentuan jumlah kutub (Fitzgerald, 2002; Wildi, 2006; Chapman, 2012). Penyesuaian terhadap struktur akhir belitan stator merupakan dasar untuk pabrikan struktur rotor bermagnet permanen fluks radial. Pabrikan tersebut berupa pembuatan inti rotor untuk perletakan magnet permanen fluks radial dan poros rotor sebagai penghubung ke poros penggerak mula. Keberadaan magnet permanen fluks radial pada inti rotor, didasarkan kepada dimensi dan nilai kerapatan fluks magnet yang tersedia di pasaran, jumlah magnet, dan penyusunannya pada inti rotor (Meier, 2006; Aleksashkin, 2008; Strous, 2010; Erol, 2014).

Sejumlah persamaan diperlukan untuk penghitungan. Jumlah kutub generator arus bolak-balik tergantung kepada kecepatan rotor dan frekuensi dari gaya gerak listrik (ggl) yang dibangkitkan (Smith, 2001; Fitzgerald, 2003; Wildi, 2006; Meier, 2006; Chapman, 2012), hubungan tersebut ditunjukkan seperti persamaan (1).

$$f = \frac{p \cdot n}{120} \quad (1),$$

dengan:

$f$  = frekuensi tegangan, [hertz];  $p$  = jumlah kutub pada rotor; dan  $n$  = kecepatan putar rotor, [rpm, root per minute].

Untuk perhitungan tegangan keluaran alternator, dipengaruhi oleh beberapa tahapan yang harus dihitung terlebih dahulu, yaitu kerapatan fluks magnet maksimum, area luas magnet, dan fluks maksimum yang dihasilkan. Kerapatan fluks magnet maksimum (Hsu, 1998) dihitung dengan persamaan (2).

$$B_{maks} = B_r \cdot \frac{l_m}{B_m \cdot \delta} \quad (2),$$

dengan:  $B_{maks}$  = kerapatan fluks magnet maksimum, [tesla];  $B_r$  = kerapatan fluks magnet, [tesla];  $l_m$  = tinggi magnet, [m]; dan  $\delta$  = celah udara, [m].

Keliling rotor dihitung dengan persamaan (3).

$$K_r = \pi \cdot d_r \quad (3),$$

dengan:  $K_r$  = keliling rotor, [m]; dan  $d_r$  = diameter rotor, [m].

Keliling rotor tidak termagneti (Hsu, 1998) dihitung dengan persamaan (4).

$$K_{r0} = df \cdot N_{df} \quad (4),$$

dengan:  $K_{r0}$  = keliling rotor tidak termagneti, [m]; dan  $df$  = jarak antar magnet, [m]; dan  $N_{df}$  = jumlah jarak antar magnet.

Keliling rotor (Hsu, 1998) termagneti dapat dihitung dengan persamaan (5).

$$K_{r1} = K - K_{r0} \quad (5),$$

dengan:  $K_{r1}$  = keliling rotor termagneti, [m].

Persentase keliling rotor termagneti (Hsu, 1998) dihitung dengan persamaan (6).

$$K_{r1}\% = \frac{K_{r1}}{K} \cdot 100\% \quad (6),$$

dengan:  $K_{r1}\%$  = persentase keliling rotor termagneti, [%].

Area (luas) permukaan magnet (Hsu, 1998) dihitung dengan persamaan (7).

$$A_m = (l_m \cdot w_m) \cdot 2 \cdot K_{r1}\% \quad (7),$$

dengan:  $A_m$  = area (luas) permukaan magnet, [m<sup>2</sup>]; dan  $w_m$  = lebar magnet, [m].

Fluks maksimum yang dihasilkan dihitung (Hsu, 1998) dengan persamaan (8).

$$\Phi_{maks} = A_m \cdot B_{maks} \quad (8),$$

dengan:  $\Phi_{maks}$  = fluks maksimum, [weber].

Tegangan keluaran alternator terdiri atas sejumlah tegangan per grup kumparan yang dihubungkan secara seri. Tegangan per grup kumparan (Fitzgerald, 2003; Wildi, 2006; Chapman, 2012) dihitung dengan persamaan (9).

$$E_{grup\_kumparan} = 4.44 \cdot N \cdot f \cdot \Phi_{maks} \cdot \frac{N_s}{N_r} \quad (9),$$

dengan:  $E_{\text{grup\_kumparan}}$  = tegangan per grup kumparan, [volt];  $N$  = jumlah lilitan;  $N_g$  = jumlah grup kumparan; dan  $N_f$  = jumlah fase.

Tegangan keluaran total alternator ( $E_{\text{belitan}}$ ) diperoleh dari tegangan setiap 6 grup kumparan dipasang seri,  $E_{\text{belitan}}$  dihitung dengan persamaan (10).

$$E_{\text{belitan}} = E_{\text{grup\_kumparan}} \cdot 6 \quad (10)$$

Daya alternator teoritis yang dihasilkan (Fitzgerald, 2003; Wildi, 2006; Chapman, 2012) dengan persamaan (11).

$$S = V \cdot I \quad (11)$$

dengan:  $S$  = daya, [VA];  $V$  = tegangan keluaran, [volt]; dan  $I$  = arus, [ampere].

Penghitungan untuk kecepatan putaran sudut, torsi mekanis, dan daya mekanis didasarkan kepada persamaan (1) tentang kecepatan putaran poros rotor. Kecepatan putaran sudut ( $\omega$ ) dihitung (Fitzgerald, 2003; Wildi, 2006; Chapman, 2012) dengan persamaan (12).

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot n}{60} \quad (12)$$

dengan:  $\omega$  = kecepatan sudut poros rotor, [rad./det.].

Torsi mekanis merupakan gaya yang digunakan untuk penggerakan sesuatu dengan jarak dan arah tertentu (Meier, 2006). Hasil kali gaya dan jarak adalah torsi mekanis, maka sebelum ditentukan torsi mekanis harus diketahui terlebih dahulu nilai gaya (Fitzgerald, 2003; Wildi, 2006; Chapman, 2012) dihitung dengan persamaan (13).

$$F = m \cdot a \quad (13)$$

dengan:  $F$  = gaya, [newton, N];  $m$  = massa, [kg]; dan  $a$  = percepatan gravitasi (dipilih = 9,81), [m/s<sup>2</sup>].

Torsi mekanis lintasan translasi (Fitzgerald, 2003; Wildi, 2006; Chapman, 2012) dihitung dengan persamaan (14).

$$T_{\text{translasi}} = F \cdot l \quad (14)$$

dengan:  $T_{\text{translasi}}$  = torsi mekanis lintasan translasi, [N.m] dan  $l$  = jarak lintasan translasi, [meter, m].

Konversi lintasan translasi ke bentuk putaran (lintasan rotasi) dilakukan melalui pengubahan terhadap nilai satu putaran sama dengan dua  $\pi$  radian atau 2 . 3,142 radian, sehingga satu putaran sama dengan 6,284 radian (6,284 rad.), sehingga diperoleh hubungan (Fitzgerald, 2003; Wildi, 2006; Chapman, 2012) seperti persamaan (15).

$$T_{\text{translasi}} = 6,284 \cdot T_{\text{rotasi}} \quad (15)$$

Daya mekanis (Fitzgerald, 2003; Wildi, 2006; Chapman, 2012) dihitung dengan persamaan (16).

$$P_m = T_{\text{rotasi}} \cdot \omega \quad (16)$$

dengan:  $P_m$  = daya mekanis, [watt] dan  $T_{\text{rotasi}}$  = torsi mekanis lintasan rotasi, [N.m/rad].

Berdasarkan latar belakang tersebut, diperlukan pembentukan belitan stator sesuai jumlah alur pada inti stator dan luas masing-masing alur dan pabrikasi struktur inti rotor beserta rumah magnet untuk peletakan magnet permanen fluks radial. Keberadaan magnet permanen pada rotor generator berfungsi sebagai pengganti kumparan medan rotor, sehingga tidak diperlukan eksitasi tambahan. Saat magnet permanen pada rotor diputar, maka tegangan induksi dalam belitan stator dibangkitkan. Sebuah generator dengan magnet permanen fluks radial merupakan bentuk khas dari kutub generator magnet permanen dalam belitan jangkar yang berputar konstan (Aleksashkin, 2008; Strous, 2010; Kurihara, 2010; Pop, 2013; Erol, 2014). Tujuan penelitian ini ditekankan kepada: (a) memperoleh struktur belitan stator, (b) memperoleh struktur rotor dan tata letak magnet permanen fluks radial pada inti rotor, (c) memperoleh nilai daya elektrik teoritis yang dihasilkan oleh alternator fase-tunggal dan nilai daya mekanis teoritis yang dibutuhkan dari penggerak mula.

## METODE

Metode penelitian sesuai tujuan penelitian, yaitu (a) pembuatan struktur belitan stator berupa: (i) pengkondisian bentuk fisik rumah dan inti stator, (ii) kalkulasi jumlah alur dan luas masing-masing alur, dan (iii) penentuan tipe kumparan (koil), jumlah kumparan dalam grup, rangkaian akhir untuk pembentukan belitan stator; (b) pabrikasi struktur rotor, melalui: (i) pembuatan pola rumah magnet pada inti dan poros (as) rotor, dan (ii) pabrikasi poros dan rumah magnet pada inti rotor; dan (c) perhitungan teoritis dilakukan, melalui: (i) perhitungan teoritis terhadap tegangan keluaran yang dihasilkan alternator dan (ii) perhitungan teoritis daya mekanis minimum yang diperlukan dari penggerak mula yang digunakan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN Struktur Belitan Stator

Upaya perolehan struktur belitan stator dilakukan melalui i) pengkondisian kembali terhadap fisik rumah dan inti stator bekas dan penghitungan jumlah dan luas alur, ii) struktur kumparan, dan iii) jumlah kutub dan hubungan kumparan dalam grup.

## Pengkondisian kembali fisik rumah dan inti stator bekas dan jumlah dan luas alur

Kondisi rumah stator harus dalam keadaan baik, tidak terdapat karat atau korosi berlebihan, agar mampu sebagai tempat dan pelindung terhadap inti dan kumparan stator. Bentuk fisis rumah dan inti stator bekas yang telah dikondisikan, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Bentuk fisis rumah dan inti stator bekas yang telah dikondisikan

Berdasarkan Gambar 1 ditunjukkan, bahwa rumah stator masih layak dan harus dilakukan finalisasi dengan pengecatan. Dalam pemanfaatan inti stator bekas dari inti stator motor induksi fase-tiga, yaitu diperoleh kondisi inti stator dengan sejumlah alur untuk tempat kumparan stator yang telah dibersihkan dari karat, agar dapat sebagai tempat kumparan stator yang baru dan dapat berkinerja baik. Bentuk fisik inti stator dengan ketebalan 60 mm, mempunyai diameter dalam sebesar 87 mm. Inti stator terbuat dari bahan besi yang tersusun rapi dari sejumlah besi berbentuk lapisan tipis dengan tujuan, untuk pengurangan rugi-rugi besi akibat arus pusar (*eddy current's*). Inti stator sebagai tempat penanaman kumparan, dimana kumparan sebagai tempat keberlangsungan gaya gerak listrik (ggl).

Alur berbentuk setengah (semi) terbuka menyerupai bentuk trapezium dengan dimensi 4 mm, 6 mm, dan 20 mm, sehingga diperoleh nilai luas untuk lilitan dalam alur

$$L = \frac{a+b}{2} \cdot t = \frac{6+4}{2} \cdot 20 = 100 \text{ mm}^2$$

Berdasarkan luas penampang alur sebesar 100 mm<sup>2</sup>, maka dihitung jumlah lilitan per alur dengan penggunaan kawat *email* ukuran 0,45 mm<sup>2</sup>, sehingga diperoleh 222,22 lilit. Jumlah lilitan per alur sebanyak 222,2 lilit, dikurangi 10% untuk penempatan pasak, agar tidak

terjadi penonjolan kawat *email* yang akan berakibat kawat *email* tersebut putus oleh rotor yang bergerak, maka diperoleh  $= \frac{222,22}{100} \times 10 = 22,22$  lilit.

Jumlah lilitan peralur 222,22 dikurangi toleransi untuk pasak sebanyak 22,22 lilitan, maka diperoleh 200 lilitan per alur. Untuk penentuan jumlah kumparan dengan diketahui lilitan per alur sebanyak 200 lilitan dan jumlah alur 36 alur, maka penentuan jumlah kumparan keseluruhan dihitung dengan

$$\Sigma \text{kumparan} = \frac{\text{lilitan per alur} \cdot \Sigma \text{alur}}{2} =$$

$$\Sigma \text{kumparan} = \frac{200 \cdot 36}{2} = 3.600 \text{ lilitan.}$$

Jumlah kumparan diperoleh sebanyak 3.600 lilitan, dengan panjang per lilitan 21 mm, maka: 21 x 3.600 = 75.600 mm = 75,6 m.

Jumlah grup kumparan dihitung dengan penetapan jumlah fase satu, jumlah kutub sebanyak 12 (dua belas), dan langkah sebanyak setengah, sehingga

$$\Sigma \text{grup} = \Sigma \text{fase} \cdot p \cdot \text{langkah} = 1 \times 12 \times \frac{1}{2} = 6$$

grup kumparan. Jumlah kumparan per grup, yaitu:

$$\frac{\Sigma \text{kumparan}}{\text{grup}} = \left( \frac{\Sigma \text{alur}}{\Sigma \text{grup}} \right) \cdot \text{langkah} = \left( \frac{36}{6} \right) \cdot \frac{1}{2} = 3$$

kumparan per grup.

### Struktur kumparan

Pembuatan kumparan stator dilakukan dalam beberapa tahapan, yaitu: (i) pemasangan isolasi mika pada alur stator, penggulangan kawat *email* untuk pembuatan kumparan, dan pemasangan kumparan dan (ii) pemasangan dan penyambungan kumparan.



Gambar 2 Tahapan-tahapan pemasangan mika pada alur stator, isolasi mika pada alur stator, penggulangan kawat *email* untuk pembuatan kumparan, dan pemasangan kumparan

Berdasarkan Gambar 2 ditunjukkan, bahwa pemasangan mika dilakukan, agar saat pemasangan kumparan dapat terlindungi dari kemungkinan hubung singkat pada stator. Keberadaan mika tersebut juga sebagai isolator ganda pada stator, agar tidak terjadi induksi pada stator. Penggulangan kawat *email* mutlak digunakan mal (pola), agar kumparan dapat tersusun rapi dalam pemasangannya di stator dan tidak terjadi penumpukan pada stator.

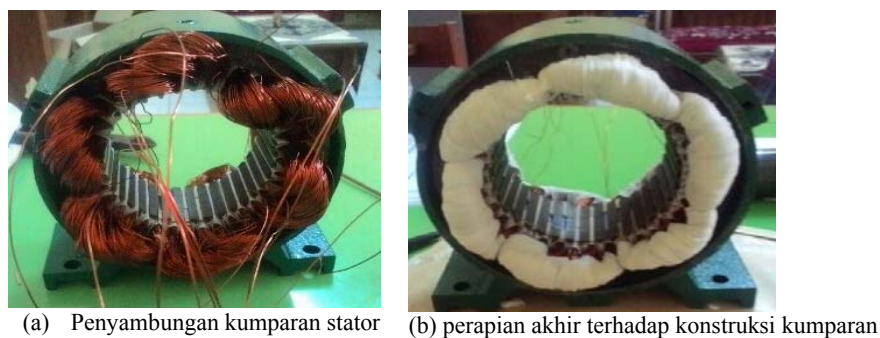
### (i) Pemasangan isolasi mika pada alur stator, penggulangan kawat *email* untuk pembuatan kumparan

Tahapan-tahapan pemasangan mika pada alur stator, isolasi mika pada alur stator, penggulangan kawat *email* untuk pembuatan kumparan, dan pemasangan kumparan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Pemasangan kumparan pada stator harus hati-hati, agar tidak terjadi goresan pada kumparan yang dapat berakibat induksi. Pemasangan kumparan pada alur stator digunakan sasak, agar dapat tersusun rapi dalam alur stator.

### (ii) Pemasangan dan penyambungan kumparan

Pemasangan dan penyambungan kumparan pada alur stator, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



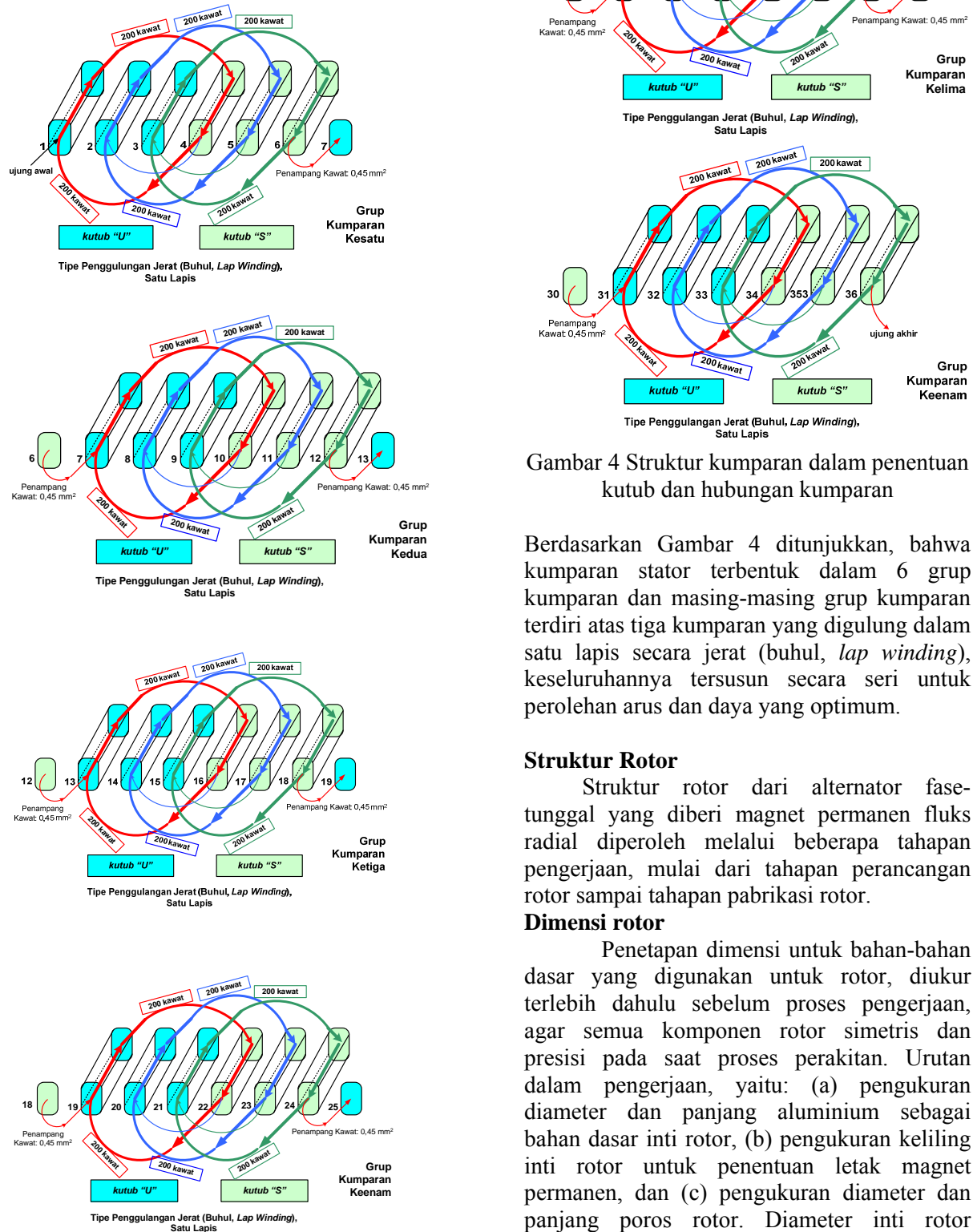
Gambar 3 Pemasangan dan penyambungan kumparan pada alur stator

Berdasarkan Gambar 3 ditunjukkan, bahwa penyambungan kumparan stator diperlukan untuk penentuan akhir struktur belitan rotor untuk pembangkitan tegangan listrik. Perapian akhir terhadap belitan stator berupa pengikatan kumparan-kumparan dengan tali, agar terlihat

lebih rapi dan saat pemasangan tutup stator tidak terjadi gesekan yang dapat berakibat kumparan tergores.

**Jumlah kutub dan hubungan kumparan dalam grup**

Struktur kumparan dalam penentuan kutub dan hubungan kumparan, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Struktur kumparan dalam penentuan kutub dan hubungan kumparan

Berdasarkan Gambar 4 ditunjukkan, bahwa kumparan stator terbentuk dalam 6 grup kumparan dan masing-masing grup kumparan terdiri atas tiga kumparan yang digulung dalam satu lapis secara jerat (buhul, lap winding), keseluruhannya tersusun secara seri untuk perolehan arus dan daya yang optimum.

**Struktur Rotor**

Struktur rotor dari alternator fase-tunggal yang diberi magnet permanen fluks radial diperoleh melalui beberapa tahapan pengerjaan, mulai dari tahapan perancangan rotor sampai tahapan pabrikasi rotor.

**Dimensi rotor**

Penetapan dimensi untuk bahan-bahan dasar yang digunakan untuk rotor, diukur terlebih dahulu sebelum proses pengerjaan, agar semua komponen rotor simetris dan presisi pada saat proses perakitan. Urutan dalam pengerjaan, yaitu: (a) pengukuran diameter dan panjang aluminium sebagai bahan dasar inti rotor, (b) pengukuran keliling inti rotor untuk penentuan letak magnet permanen, dan (c) pengukuran diameter dan panjang poros rotor. Diameter inti rotor berdasarkan diameter dalam inti stator yang tersedia 87 mm, sedangkan penetapan panjang

inti rotor berdasarkan panjang magnet permanen dan luas permukaan inti stator. Diameter inti rotor harus lebih kecil dari diameter dalam inti stator dengan tujuan, agar diperoleh celah udara (*air gap*) antara inti rotor dan stator. Diameter inti rotor ditetapkan sebesar 85 mm, sehingga diperoleh selisih 1 mm sebagai celah udara sepanjang keliling inti stator dan rotor.

Pengukuran keliling inti rotor digunakan untuk penentuan letak magnet permanen dan ukuran alur magnet sebagai rumah magnet. Ukuran alur magnet disesuaikan dengan dimensi magnet permanen fluks radial yang tersedia di pasaran. Ketersediaan magnet permanen fluks radial, yaitu panjang 40 mm, lebar 17 mm, dan tebal 5 mm, sehingga diperoleh jarak antar magnet permanen 5,5 mm. Pengukuran diameter dan panjang poros rotor, dengan diameter poros rotor harus sesuai dengan diameter lubang poros pada inti rotor dan sesuai dengan diameter *bearing* yang tersedia di pasaran, sedangkan panjang poros rotor disesuaikan dengan panjang *casing* alternator. Massa fisik rotor secara keseluruhan sebesar 1,22 kg, terdiri atas massa 12 buah magnet Neodymium sebesar 0,28 kg, massa rumah magnet yang terbuat dari aluminium sebesar 0,26 kg, dan massa poros sebesar 0,69 kg.

#### Penempatan poros dan alur magnet pada inti rotor

Penempatan poros rotor pada inti rotor dilakukan terlebih dahulu sebelum pembuatan alur magnet. Bentuk fisik poros dan rumah magnet pada inti rotor, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Bentuk fisik poros dan alur magnet pada inti rotor

Berdasarkan Gambar 6 ditunjukkan, bahwa inti rotor yang telah digabung dengan poros rotor sebelum proses pembentukan alur magnet, kemudian dilakukan pabrikan alur magnet, dan diakhiri dengan pabrikan poros rotor. Poros rotor dibentuk dengan tiga ukuran diameter poros rotor yang berbeda-beda.

#### Penempatan magnet permanen ke rumah magnet

Magnet permanen yang digunakan merupakan jenis Neodymium. Jenis magnet Neodymium dipilih, karena dengan kerapatan fluks magnet cukup kuat, 2500 gauss atau 250 mT. Jumlah kutub magnet ditentukan sebanyak 12 kutub, terdiri atas 6 kutub utara dan 6 kutub selatan. Penempatan magnet permanen pada rumah magnet di inti poros rotor, seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7 Penempatan magnet permanen pada rumah magnet di inti poros rotor

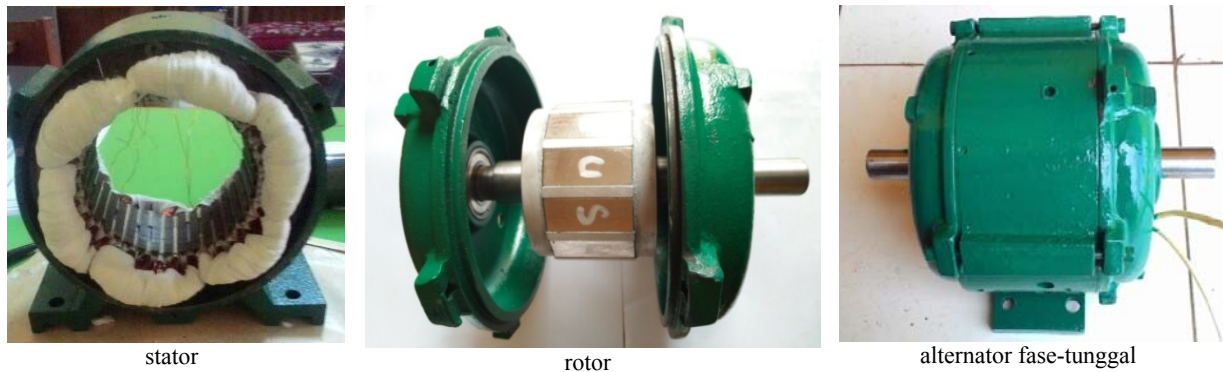
Berdasarkan Gambar 7 ditunjukkan, bahwa penempatan magnet permanen fluks radial dilakukan secara selang-seling dengan susunan kutub-kutub, yaitu U-S-U-S-U-S-U-S-U-S-U-S.

#### Daya Listrik Keluaran yang Dihasilkan dan Daya Mekanis Minimum yang Dibutuhkan

Tahapan teoritis penghitungan daya keluaran yang dihasilkan alternator, yaitu perakitan rotor dan stator, penghitungan daya listrik teoritis yang dihasilkan alternator, dan daya mekanis minimum yang dibutuhkan dari penggerak mula.

#### Rakitan stator dan rotor

Perakitan stator dan rotor, seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Perakitan stator dan rotor

### Daya listrik teoritis yang dihasilkan

Perhitungan daya secara teoritis didasarkan kepada jumlah kutub sebanyak 12 dan acuan nilai frekuensi sebesar 50 hertz yang disubstitusikan ke persamaan (1), sehingga diperoleh nilai putaran yang harus dihasilkan untuk perolehan frekuensi 50 hertz dengan jumlah 12 kutub. Kecepatan putaran dihitung terlebih dahulu, agar diperoleh frekuensi 50 hertz. Kecepatan putaran dihitung dengan persamaan (1), sehingga diperoleh 500 rpm. Untuk perolehan tegangan keluaran alternator secara teoritis, dengan penentuan terlebih dahulu terhadap kerapatan fluks magnet maksimum, area luas magnet, fluks maksimum, dan tegangan keluaran alternator per koil. Kerapatan fluks magnet maksimum dihitung dengan persamaan (2), dengan nilai  $B_r = 0,25$  tesla;  $h_m = 0,005$  m;  $\delta = 0,001$  m, sehingga diperoleh

$$B_{maks} = B_r \cdot \frac{h_m}{h_m + \delta} = 0,25 \cdot \frac{0,005}{0,005 + 0,001} = 0,208 \text{ tesla.}$$

Keliling rotor dihitung dengan persamaan (3), diketahui nilai  $d = 0,085$  m, maka diperoleh  $K = \pi \cdot d = 3,142 \cdot 0,085 = 0,267$  m. Keliling rotor tidak termagneti dihitung dengan persamaan (4), dengan nilai  $\tau_f = 0,0055$  m dan  $N_{\tau_f} = 12$ , sehingga diperoleh  $K_0 = \tau_f \cdot N_{\tau_f} = 0,0055 \cdot 12 = 0,066$  m. Keliling rotor termagneti dihitung dengan persamaan (5), sehingga diperoleh  $K_1 = K - K_0 = 0,267 - 0,066 = 0,201$  m. Persentase keliling rotor termagneti dihitung dengan persamaan (6), yaitu  $K_1\% = \frac{K_1}{K} \cdot 100 = \frac{0,201}{0,267} \cdot 100 = 75\%$ .

Area (luas) magnet dihitung dengan persamaan (7), dengan nilai  $l_m = 0,04$  m;  $w_m = 0,017$  m, sehingga diperoleh  $A_{magn} = (l_m \cdot w_m) \cdot 2 \cdot K_1\% = (0,04 \cdot 0,017) \cdot 2 \cdot$

$0,75 = 0,00102 \text{ m}^2$ . Fluks magnet maksimum dihitung dengan persamaan (8), sehingga diperoleh  $\Phi_{maks} = A_{magn} \cdot B_{maks} = 0,00102 \cdot 0,208 = 0,000213$  weber.

Tegangan keluaran alternator per grup kumparan dihitung dengan persamaan (9), sehingga diperoleh

$$E_k = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \Phi_{maks} \cdot \frac{N_k}{N_f} =$$

$4,44 \cdot 600 \cdot 50 \cdot 0,000213 \cdot \frac{1}{1} = 28,41$  volt, maka tegangan keluaran alternator total (6 grup kumparan) dapat dihitung dengan persamaan (10) dan diperoleh  $E_c = E_k \cdot \sum \text{grup} = 28,41 \cdot 6 = 170,4$  volt. Berpedoman spesifikasi kawat email yang digunakan dengan luas penampang  $0,45 \text{ mm}^2$ , diperoleh arus maksimum pada sebesar 0,477 ampere, sehingga daya yang dihasilkan alternator secara teoritis dihitung dengan persamaan (11) dan diperoleh daya sebesar  $S = 170,4 \times 0,477 = 81,281$  VA (pembulatan keatas) sebesar 82 VA.

### Daya mekanis minimum yang dibutuhkan

Perhitungan daya mekanis berkaitan dengan kecepatan putaran poros alternator, frekuensi, jumlah kutub, torsi, dan kecepatan sudut. Kecepatan putaran poros penggerak mula dihitung terlebih dahulu, melalui penetapan nilai frekuensi 50 hertz. Kecepatan putaran poros dihitung dengan persamaan (1), sehingga diperoleh  $n = \frac{f \cdot 120}{P} = \frac{50 \cdot 120}{12} = 500$  rpm. Kecepatan sudut dihitung dengan persamaan (12), sehingga diperoleh:  $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 50 \cdot 500}{60} = 2618,333$  rad./det.

Gaya dihitung dengan persamaan (13) dengan nilai massa total rotor 1,22 kg dan nilai percepatan gravitasi dipilih 9,81 m/s<sup>2</sup>, maka diperoleh nilai gaya  $F = m \cdot a = 1,22 \times 9,81 = 11,97$  newton. Torsi mekanis lintasan



translasi dihitung dengan persamaan (14) dengan diketahui jarak atau panjang lintasan berupa keliling poros rotor 0,07 m berbentuk rotasi, sehingga digunakan persamaan (15) dan diperoleh  $T_{rotasi} = \frac{F \cdot l}{6284} = 11,97 \times 0,07 \times \frac{1}{6284} = 0,133 \text{ N.m/rad}$ .

Daya mekanis dihitung dengan persamaan (16), sehingga diperoleh:

$P_{m} = T_{rotasi} \cdot \omega = 0,133 \frac{\text{N.m}}{\text{rad}} \times 2618,333 \frac{\text{rad}}{\text{det}} = 349,07 \frac{\text{N.m}}{\text{det}} = 349,07 \text{ watt}$ . Daya minimum yang dibutuhkan dari penggerak mula (pembulatan keatas) sebesar 350 watt. Berdasarkan hal itu, maka pemilihan terhadap motor induksi fase-tiga sebagai penggerak mula dengan daya sekurang-kurangnya sebesar 0,5 hp, karena disesuaikan dengan ketersediaan motor induksi fase-tiga di pasaran.

## SIMPULAN DAN SARAN

### Simpulan

Simpulan berkenaan dengan tujuan penelitian, yaitu (1) struktur belitan stator berbentuk 6 (enam) grup kumparan yang terhubung seri, masing-masing grup tersusun atas 3 (tiga) kumparan yang menempati 6 (enam) alur dengan bentuk kumparan tipe jerat (*lap winding*) satu lapis; (2) Struktur rotor terdiri atas inti dan poros rotor, inti rotor berbentuk silinder berongga dimensi 60 mm (tebal), 30 mm (diameter dalam), dan 85 mm (diameter luar), dilengkapi rumah magnet untuk peletakan magnet permanen dan poros rotor berbentuk silinder sepanjang 210 mm; (3) Nilai daya elektrik teoritis alternator 81 VA dihitung dari tegangan keluaran dan arus maksimum, sedangkan daya mekanis teoritis dari penggerak mula 350 watt, dihitung nilai kecepatan sudut putar poros dan torsi mekanis.

### Saran

Untuk melengkapi kesimpulan tersebut, perlu pertimbangan terhadap luas penampang kawat email dan material penyusun rotor alternator.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Pimpinan FT UIKA Bogor atas segala fasilitas yang telah diberikan, juga kepada Pimpinan Program Studi Teknik Elektro atas kesediaan pemrosesan keikutsertaan pada penerbitan

makalah ini sebagai kegiatan keilmiahan di Semnastek 2016 FT-UMJ.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aleksashkin, Anton, Aki Mikkola. 2008. *Literature Review on Permanent Magnet Generators Design and Dynamic Behavior* (Research Report 77, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, pp. 20-56), Lappeenranta (Finland): Lappeenranta University of Technology.
- Chapman, Stephen J. 2012. *Electric Machinery Fundamentals* (pp. 4-11). New York: McGraw-Hill.
- Erol, Kurt, Halil Gör, Mehmet Demirtas. 2014. "Theoretical and experimental analyses of a single phase permanent magnet generator (PMG) with multiple cores having axial and radial directed fluxes" in *Energy Conversion and Management* 77 (2014), pp. 163–172.
- Fitzgerald, A.E., Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans. 2003. *Electric Machinery* (pp. 2-37). New York: McGraw-Hill.
- Hsu, John S. 1998. *Flux Guides for Permanent-Magnet Machines* (pp. 1-7). Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory.
- Meier, Alexandra von. 2006. *Electric Power Systems: A Conceptual Introduction* (pp. 96-97). New Jersey: Wiley-IEEE Press.
- Pop, Adrian Augustin, et.al. 2013. "Axial-flux vs. Radial-flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for Micro-wind Turbine Application" in *Proceeding of EPE'13 ECCE Europe*, Lille, France, pp. P.1-P.10.
- Smith, Nigel P.A. 2001. *Motor as Generators for Micro-hydro Power* (pp. 39-41). Warwickshire: Intermediate Technology Development Group (ITDG).
- Strous, T.D. 2010. *Design of a Permanent Magnet Radial Flux Concentrated Coil Generator for a Range Extender Application*. MSc. Thesis Report (pp. 12-22), Delft: Delft University of Technology.
- Wildi, Theodore. 2006. *Electrical Machines, Drive, and Power Systems* (pp. 3-36). New Jersey: Prentice Hall.