

Optimization of Brushless DC Motor Efficiency in Electric Vehicles

Norman Iskandar^{1*}, Hafiz Ramadhan¹ dan Ismoyo Haryanto^{1,2}

¹Departemen Teknik MesinFakultas Teknik Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Sudharto, SH. Tembalang-Kota Semarang 50275. Telp +62247460059

²National Center for Sustainable Transportation Technology, Indonesia Center for Research and Community Services (CRCS) Building, Lv. 2, Institute Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No. 10, Kota Bandung 40132

*Corresponding author: norman.undip@gmail.com

Abstract. The selection of the type of motor that will be used on the electric vehicle must be done with the right calculation. The motor must have mild characteristics, require little maintenance, produce a large amount of power. Brushless DC motors are the type of motor that is currently being considered for use in electric vehicles because of their properties and advantages. Efficiency in motors for electric vehicles is one of the important things that is studied along with studies of batteries and their supporting systems for electric vehicles. This study aims to increase the efficiency value of brushless DC motors that will be used in electric vehicles whose criteria have been determined. The analytic approach is used as the initial stage in this study. Analytical studies include aspects of electromechanical analysis, calculation of geometric models, fluxes, currents, losses, and thermal aspects as well as efficiency which are used as initial references for the optimization process. For the optimization process, the software simulation approach is used by modeling the program using the genetic algorithm function. The results obtained from the analytical study obtained an efficiency value of 91.92% while using the genetic algorithm function, the efficiency value obtained was 96.05%.

Abstrak. Pemilihan jenis motor yang akan digunakan pada kendaraan listrik ini harus dilakukan dengan perhitungan yang tepat. Motor tersebut harus mempunyai karakteristik yang ringan, membutuhkan sedikit perawatan, menghasilkan daya yang besar. Motor brushless DC adalah tipe motor yang saat ini banyak dipertimbangkan penggunaannya untuk kendaraan listrik karena sifat dan keunggulannya. Efisiensi pada motor untuk kendaraan listrik adalah salah satu hal penting yang dikaji seiring dengan kajian tentang baterai dan sistem pendukungnya untuk kendaraan listrik. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan nilai efisiensi motor brushless DC yang akan digunakan pada kendaraan listrik yang kriterianya telah ditentukan. Pendekatan secara analitik digunakan sebagai tahapan awal dalam kajian ini. Kajian secara analitik meliputi aspek analisis elektromekanikal, perhitungan model geometri, fluks, arus, rugi-rugi dan aspek termal serta efisiensi yang digunakan sebagai acuan awal untuk proses optimasi. Untuk proses optimasi digunakan pendekatan dengan simulasi software yaitu dengan pemodelan program menggunakan fungsi genetic algorithm. Hasil yang diperoleh adalah dari kajian analitik diperoleh nilai efisiensi sebesar 91,92% sedangkan dengan menggunakan fungsi genetic algorithm, nilai efisiensi yang didapatkan sebesar 96,05%.

Kata kunci: efisiensi, kendaraan listrik, motor listrik, motor *brushless DC*, optimasi.

© 2019. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Kendaraan bermotor merupakan salah satu moda transportasi yang paling efektif digunakan masyarakat dalam aktivitasnya. Seiring perkembangan jaman, masyarakat pun mulai banyak menggunakan kendaraan bermotor. Hal tersebut dapat dilihat dari jumlah kendaraan, khususnya di Indonesia, yang semakin tahun semakin meningkat. Pada tahun 2009, jumlah kendaraan bermotor sudah mencapai 67,3 juta dan pada tahun 2016 jumlahnya meningkat pada angka 129,2 juta. Sehingga dalam kurun waktu 7 tahun

sudah mengalami peningkatan sebanyak hampir 2 kali lipatnya. Karena secara umum kebanyakan kendaraan bermotor masih menggunakan mesin pembakaran dalam yang membutuhkan Bahan Bakar Minyak (BBM) sebagai bahan bakarnya, maka hal tersebut sangat berpengaruh terhadap tingginya tingkat konsumsi BBM. Masalah perlindungan lingkungan terkait dengan polusi hasil pembakaran BBM dan isu energi telah menjadi dua tema paling menonjol di abad baru ini. Terkait dengan dua hal tersebut maka dunia transportasi memiliki alternatif solusinya yaitu

kendaraan/mobil listrik menjadi salah satu cara untuk menyelesaikan kedua masalah ini

Kendaraan listrik saat ini mengalami perkembangan yang cukup signifikan di dunia. Kecenderungan ini berasal dari banyaknya orang yang sudah mulai tergerak melihat pemanasan global yang semakin parah setiap harinya. Pemerintah pun mulai melihat kendaraan listrik sebagai sebuah solusi ditengah menurunnya pasokan minyak dunia yang setiap harinya dipakai untuk berbagai macam aktivitas. Saat ini banyak negara-negara di dunia berlomba-lomba untuk memproduksi kendaraan listrik yang efisien dan murah untuk menggantikan kendaraan bermotor yang lama.

Kendaraan listrik setidaknya dua kali lebih efisien daripada kendaraan konvensional sehingga perlu didorong lebih banyak kendaraan listrik daripada kendaraan konvensional. Salah satu ide yang dikembangkan adalah retrofit kendaraan konvensional ke kendaraan listrik selain membangun kendaraan listrik dari nol.

Salah satu tantangan dalam perkembangan kendaraan listrik adalah terkait dengan penyediaan motor listrik sebagai sistem penggeraknya selain tantangan disektor penyimpan daya. Kebutuhan akan sistem penggerak listrik yang efisien yang memiliki torsi dan kecepatan tinggi, biaya perawatan yang rendah semakin meningkat [1].

Banyaknya tipe penggerak menjadikan pemilihan motor listrik sebagai alat pengubah energi listrik menjadi energi mekanik untuk kendaraan listrik menjadi hal yang penting. Motor listrik setidaknya harus mempunyai karakteristik yang ringan, membutuhkan sedikit perawatan, menghasilkan daya yang besar, dan memiliki voltase nominal yang tinggi. Hal tersebut ditujukan agar motor tersebut dapat digunakan untuk kendaraan listrik dengan penumpang dan muatan yang maksimal sehingga memerlukan torsi dan daya awal yang tinggi.

Hashernnia [2] telah penelitian untuk membandingkan serta mengkaji manfaat dan kelebihan berbagai jenis motor listrik untuk melihat yang paling cocok untuk digunakan dalam aplikasi kendaraan listrik (EV). Hasil kajiannya menyatakan untuk aplikasi EV, DC *brushless* dan motor magnet permanen lebih cocok daripada yang lain.

Motor DC brushless (BLDC) sangat populer karena memiliki kelebihan seperti daya tahan tinggi karena kesederhanaan desain dan kemampuan rpm yang tinggi, dapat diaplikasikan dalam ukuran besar dan kecil, efisiensi tinggi, kebisingan rendah, kontrol kecepatan mudah dan umur lebih lama torsi awal yang tinggi. Selain itu biaya perawatan yang rendah, rasio volume

terhadap torsi yang rendah, gangguan elektromagnetik yang rendah [3,4,5].

Beberapa penelitian terkait aplikasi motor DC brushless diantaranya seperti yang dilakukan oleh Umadevi dkk [6]. Mereka telah melakukan kajian dan penelitian terhadap brushless DC motor untuk melakukan kajian optimisasi desain dengan menggunakan Generalized Regression Neural Network (GRNN).

Bertujuan mencari cara menerapkan motor DC brushless ke mobil listrik Luo dkk merancang sistem kontrol dan disimulasikan dengan MATLAB. Hasil penelitian menunjukkan bahwa motor DC brushless memiliki sifat mampu kontrol yang baik, yang membuatnya cocok untuk diaplikasikan ke mobil listrik [7].

Salah satu alat yang ampuh untuk melakukan optimasi adalah genetic algorithm (GA) atau algoritma genetika. Gholamian dkk [8] menggunakan GA untuk melakukan optimasi guna mencari desain yang optimal pada motor stator internal slotted axial flux yang akan dipakai pada kendaraan listrik.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimasi efisiensi pada motor DC brushless yang akan diaplikasikan pada kendaraan listrik yang lebih merujuk ke tipe bus.

Model analitik motor listrik dibuat sebagai tolak ukur untuk mencari metode optimasi yang paling pas untuk model analitik. Model analitik motor dijelaskan dan terdiri dari beberapa persamaan. Setiap persamaan yang digunakan dalam pemodelan juga dijelaskan. Setelah itu, perlu adanya optimasi motor untuk meningkatkan performa motor. Masalah optimasi dengan batasan dan variabel desain digunakan dalam pemodelan ini. Optimasi dilakukan untuk peningkatan efisiensi motor. Optimasi yang dilakukan dengan menggunakan algoritma genetika.

Metode Penelitian

Analisis elektromekanikal

Daya elektromekanikal dapat diperoleh melalui hubungan torsi dengan kecepatan angular ataupun dengan bentuk gaya elektromotif seperti pada Persamaan 1 dan Persamaan 2.

$$P_{em} = T_q \omega = \sum_{i=1}^m E_i I_i \quad (1)$$

$$T_q \omega = 2EI \quad (2)$$

Dimana T_q adalah torsi elektromagnetik, ω adalah kecepatan angular, E adalah gaya elektromotif pada fase i, I adalah arus yang mengalir pada fase i, m adalah jumlah fase.

EMF (*Electromotive Force*) dihitung berdasarkan variasi dari fluks yang berhubungan

dengan kumparan menggunakan hukum Lenz. EMF dapat dihitung dengan Persamaan 3.

$$E = \frac{n}{4} \frac{d\phi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{n}{4} \frac{2\phi}{\pi/p} \omega \quad (3)$$

dimana n didapat dari Persamaan 4.

$$n = \frac{2}{3} conductors \quad (4)$$

dimana n adalah jumlah konduktor, π/p adalah pole pitch, ϕ adalah fluks. Fluks didapat dari Persamaan 5.

$$\phi = B_e S_p \quad (5)$$

dimana S_p adalah kutub magnetik dan B_e adalah induksi magnetik maksimum pada celah udara. Dengan menggabungkan Persamaan 2 sampai 5, maka didapat Persamaan 6 dan Persamaan 7.

$$T_q = nIB_e \frac{S_e}{2\pi} \quad (6)$$

$$S_e = 2pS_p \quad (7)$$

dimana S_e adalah total area dari celah udara. Persamaan 2.6 menunjukkan torsi elektromagnetik didapat dari pengalian area celah udara dengan induksi magnetik pada celah udara dan nI . Untuk fluks BLDC motor, total area dari celah udara didapat pada Persamaan 8.

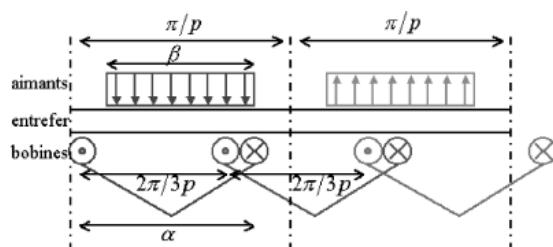
$$S_e = \pi D_s L_m \quad (8)$$

dimana D_s adalah diameter lubang stator dan L_m adalah panjang magnet motor. Dari Persamaan 4, 5, 7, dan 8 dapat disederhanakan menjadi Persamaan 9.

$$E = \frac{n}{4} B_e D_s L_m \omega \quad (9)$$

dari Persamaan 9 kita dapat mencari arus nominal yang mengalir dalam motor menggunakan Persamaan 10.

$$I_b = (T_e \omega) / (2E) \times 10^{-6} \quad (10)$$



Gambar 1. Daerah sekitar celah udara, magnet dan kumparan stator [9].

Fluks yang melalui kumparan dihitung dengan integrasi dari induksi magnetik pada area tertutup pada ujung kumparan, didefinisikan sebagai *angle* α . Pelebaran dari *angle* α didefinisikan sebagai α_i yang dinyatakan pada persamaan 11 sampai persamaan 13.

$$\alpha = \frac{\pi}{p} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\pi}{p} \quad (12)$$

$$\alpha_i = \frac{\alpha}{5} \quad (13)$$

Perhitungan Model Geometri

Parameter geometri utama ditunjukkan pada Gambar2. Dimana hubungan parameter geometris tersebut dapat dinyatakan seperti pada persamaan 14 sampai persamaan 16.

$$S_{enc} \approx hd \left[2\pi \left(\frac{D_s}{2} - eb \right) - \pi hd - N_e (li + ld) \right] \quad (14)$$

$$S_{enc} k_r = \frac{3}{2} n \frac{I}{\delta} \quad (15)$$

$$S_{enc} = 3nlb / (2\delta kr) \quad (16)$$

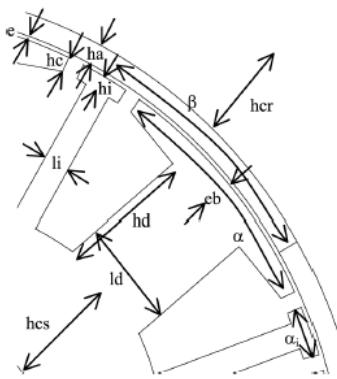
Persamaan 17 sampai persamaan 20 digunakan untuk perhitungan diameter luar dan diameter dalam stator.

$$D_{ext} = D_s + 2(e + hd + hcr) \quad (17)$$

$$D_{int} = D_s - 2(eb + hd + hcs) \quad (18)$$

$$hc = \frac{eb}{\cos(\frac{\alpha}{2})^2} \left(\frac{1}{\cos(\frac{\alpha}{2})} - 1 \right) \quad (19)$$

$$hi = \frac{D_s}{2} \left[1 - \cos(\frac{\alpha}{2}) \right] + hc \cos(\frac{\alpha}{2}) \quad (20)$$



Gambar 2. Model geometri motor BLDC [9].

Dimana S_{enc} adalah total bagian dari celah, $k_r < 1$ faktor pengisi celah, δ adalah densitas arus pada konduktor, D_{ext} adalah diameter luar, D_{int} adalah diameter dalam, dan N_e adalah jumlah celah.

Ketinggian hc dihitung guna mendapatkan angle yang tepat antara gigi utama dan sepatu kutub. Pusat ketebalan dari pelebaran gigi tengah hi dihitung agar ketinggian antara gigi tengah sama dengan ketinggian gigi utama.

Radius rata-rata ujung kumparan dapat dihitung dengan Persamaan 21.

$$R_{tb} \approx \frac{ld-li}{4} + \left(\frac{D_s}{2} - eb - \frac{hd}{2} \right) \frac{\pi}{2Ne} \quad (21)$$

Sehingga didapat panjang median dari setengah putaran yang dijelaskan pada Persamaan 22 dan persamaan 23.

$$L_{ds} \approx \frac{L_m}{k_{foi}} + \pi R_{tb} \quad (22)$$

dimana $k_{foi} < 1$ adalah faktor bulk dari lembaran logam.

$$L_{ds} \approx \frac{L_m}{k_{foi}} + \left[\left(\frac{D_s}{2} - eb - \frac{hd}{2} \right) \frac{\pi}{2Ne} - \frac{li}{2} \right] \quad (23)$$

$$M_a = d_a p \beta h a \left[ha + 2 \left(\frac{D_s}{2} + e \right) \right] L_m r_{rs} \quad (24)$$

$$M_{cr} = d_{cr} \pi h_{cr} \left[h_{cr} + 2 \left(\frac{D_s}{2} + e + ha \right) \right] L_m r_{rs} \quad (25)$$

$$M_{cs} = d_t \pi h_{cs} \left[2 \left(\frac{D_s}{2} - eb - hd \right) - h_{cs} \right] L_m \quad (26)$$

$$M_{ds} \approx d_t N_e \left[(ld + li) hd + \left(\alpha \frac{eb + hc}{2} + \alpha_i \frac{hi + hc}{2} \right) \frac{D_s}{2} \right] L_m \quad (27)$$

$$M_{cu} = d_{cu} \frac{3}{2} n \frac{I}{\delta} L_{ds} \quad (28)$$

Untuk mendapatkan massa total seperti pada Persamaan 29, didapat dengan penjumlahan dari bagian-bagian yang aktif seperti pada Persamaan 24 sampai Persamaan 28.

$$M_{tot} = M_a + M_{cr} + M_{cs} + M_{ds} + M_{cu} \quad (29)$$

dimana M_a adalah massa magnet, M_{cr} adalah massa dari sambungan rotor, M_{cs} adalah massa dari sambungan stator, M_{ds} adalah massa dari sambungan stator, dan M_{cu} adalah massa dari gigi tembaga. Sedangkan d_a adalah densitas magnet, d_{cr} adalah densitas dari sambungan rotor, d_t adalah densitas dari gigi stator, dan d_{cu} adalah densitas dari gigi tembaga. M_{tot} adalah massa total dari bagian-bagian akif. $1.2 \geq r_{rs} \geq 1$. k_{foi} adalah rasio panjang rotor pada salah satu stator.

Perhitungan Fluks

Induksi magnetik rata-rata pada gigi dinamakan B_d , sedangkan B_a merupakan induksi magnetik pada magnet, B_{cr} adalah induksi magnetik pada sambungan rotor, dan B_{cs} adalah induksi magnetik pada sambungan stator *back iron*. Fluks antara gigi utama dan pelebarannya yang dinamakan sepatu kutub, didapatkan persamaan 30.

$$B_d ld = B_e \alpha \frac{D_s}{2} \quad (30)$$

Persamaan 31 didapatkan dari Persamaan 30.

$$l_d = B_e \alpha D_s / (2Bd) \quad (31)$$

Persamaan yang sama juga diterapkan antara gigi tengah dan pelebarannya seperti Persamaan 32.

$$B_d li = B_e \alpha_i \frac{D_s}{2} \quad (32)$$

dari Persamaan 32 didapatkan Persamaan 33 seperti berikut.

$$l_i = B_e \alpha_i D_s / (2Bd) \quad (33)$$

Ketebalan dari sepatu kutub dihitung agar fluks yang melalui sepatu kutub dapat melewati gigi utama, sehingga didapat Persamaan 34.

$$B_d \left[eb - \frac{D_s}{2} \left(1 - \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{ld}{D_s} \right) \right) \right) \right] = B_e \left[\frac{\alpha}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{ld}{D_s} \right) \right] \frac{D_s}{2} \quad (34)$$

untuk mendapatkan nilai eb pada Persamaan 35, dilakukan perhitungan menggunakan persamaan awal pada Persamaan 34.

$$eb = \left(Bea \frac{Ds}{4} - Be \frac{Ds}{2} \arcsin\left(\frac{ld}{Ds}\right) + Bd \frac{Ds}{2} - Bd \frac{Ds}{2} \cos\left(\arcsin\left(\frac{ld}{Ds}\right)\right) \right) Bd \quad (35)$$

Setengah dari fluks yang melalui magnet meninggalkan salah satu sisi dari sambungan rotor dimana setengah fluks lainnya meninggalkan sisi rotor yang lainnya, sehingga didapatkan Persamaan 36 berikut ini.

$$\frac{1}{2} Ba \beta \left(\frac{Ds}{2} + e \right) = B_{cr} hcr \quad (36)$$

untuk mencari nilai hcr seperti pada Persamaan 37, digunakan Persamaan 36 sebagai persamaan awal.

$$hcr = Ba \beta \left(\frac{Ds}{2} + e \right) / (2Bcr) \quad (37)$$

Untuk hal yang sama pada fluks antara gigi utama dan sambungan stator didapatkan Persamaan 38.

$$\frac{1}{2} B_d ld = B_{cs} hcs \quad (38)$$

Persamaan 38 dapat dikembangkan menjadi Persamaan 39 seperti berikut.

$$hcs = Bdld / (2Bcs) \quad (39)$$

Sehingga didapatkan hubungan fluks antara magnet dan gigi utama pada Persamaan 40.

$$\left[Ba \beta \left(\frac{Ds}{2} + e \right) r_{rs} \right] k_{fui} = Be \alpha \frac{Ds}{2} \quad (40)$$

sehingga didapatkan Persamaan 41.

$$Ba = (Be \alpha Ds) / \left(2Kfui \left(\beta \left(\frac{Ds}{2} + e \right) r_{rs} \right) \right) \quad (41)$$

dimana $k_{fui} < 1$ adalah *leakage coefficient*, dimana kebocoran fluks magnet melewati rotor dan celah udara, tetapi tidak mencapai stator.

Perhitungan Arus

Saat tidak adanya pembebahan pada motor, perhitungan arus menjadi Persamaan 42.

$$\frac{B_{cr}}{\mu_{cr} B_{cr}} \left[\frac{hcr}{2} + \frac{\pi}{2p} \left(\frac{Ds}{2} + e + ha + \frac{hcr}{2} \right) \right]$$

$$\begin{aligned} &+ \left(\frac{B_a - B_r(1 + \alpha_a T_a)}{\mu_a} \right) ha + B_e e \\ &+ \frac{B_d}{\mu_t B_d} (eb + hd) \\ &+ \frac{B_{cs}}{\mu_t B_s} \left[\frac{hcs}{2} + \frac{\pi}{N_e} \left(\frac{Ds}{2} - eb - hd - \frac{hcs}{2} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

dimana μ_{cr} dan μ_t adalah permeabilitas relatif magnet dari sambungan rotor dan lembaran logam yang bergantung pada tingkatan induksinya. μ_a adalah permeabilitas relatif, B_r adalah induksi sisa dari magnet terhadap 0°C, α_a adalah koefisien termal, dan T_a adalah temperatur magnet tersebut.

Jika permeabilitas magnet lembaran logam dan sambungan rotor lebih kuat, maka konsumsi MMF diabaikan pada celah udara, sehingga Persamaan 43 dapat disederhanakan menjadi persamaan 43.

$$\left(\frac{B_a - B_r(1 + \alpha_a T_a)}{\mu_a} \right) ha + B_e e = 0 \quad (43)$$

Untuk induksi magnetik kritis pada magnet (B_c), arus yang diterima mencapai titik tertinggi, seperti pada Persamaan 44.

$$\left(\frac{B_c - B_r(1 + \alpha_a T_a)}{\mu_0 \mu_a} \right) ha + \frac{nI_{max}}{4p} + \frac{B_c \beta}{\mu_0 \alpha} \left(1 + \frac{2e}{Ds} \right) r_{rs} k_{fui} e = 0 \quad (44)$$

mencari nilai arus maksimum dalam kumparan didapatkan dengan Persamaan 45.

$$I_{max} = \left(\left(\frac{B_c - B_r(1 + \alpha_a T_a)}{\mu_0 \mu_a} \right) ha + \left(\frac{B_c \beta}{\alpha \mu_0} \left(1 + \frac{2e}{Ds} \right) r_{rs} k_{fui} e \right) \right) \frac{4p}{n} 10^{-3} \quad (45)$$

Perhitungan Losses

Resistansi fasa dapat dihitung pada Persamaan 46 berikut ini.

$$R_{ph} = \rho_{cu} (1 + \alpha_{cu} T_{cu}) \frac{n}{2} L_{ds} \frac{\delta}{I} \quad (46)$$

dimana ρ_{cu} adalah resistivitas tembaga terhadap 0°C, α_{cu} adalah koefisien termal, dan T_{cu} adalah temperatur kumparan. Sehingga *copper losses* didapat dari Persamaan 47.

$$P_j = 2R_{ph} I^2 \quad (47)$$

Frekuensi dasar didapat dari Persamaan 48 berikut ini.

$$freq = \frac{p\omega}{2\pi} \quad (48)$$

Iron losses didapat dari Persamaan 49 berikut ini.

$$P_f = q_t \left(\frac{f}{f_t} \right)^{1.5} \left[M_{cs} \left(\frac{B_{cs}}{B_t} \right)^2 + M_{ds} \left(\frac{B_d}{B_t} \right)^2 \right] \quad (49)$$

dimana q_t adalah kerugian spesifik terhadap frekuensi f_t dan induksi B_t . Sehingga didapatkan efisiensi yang ditulis dalam Persamaan 50.

$$\eta = \frac{T_q \omega - P_m}{T_q \omega + P_j P_f} \quad (50)$$

dimana P_m adalah kerugian mekanikal. Kerugian mekanikal ini didapat dari gesekan pada bantalan motor, gesekan antara sikat dan komutator, dan gesekan pada rotor yang disebabkan oleh turbulensi udara disekitarnya. Kerugian mekanikal ini kadang disebut juga sebagai kerugian angin.

Model Termal

Model termal yang terdapat pada penelitian ini sangat sederhana. Pada suatu kondisi, seharusnya hambatan termal konduksi selalu sangat lebih rendah daripada resistensi termal konveksi. Dengan demikian, suhunya sama untuk semua bagian stator yang bersentuhan, yaitu kumparan, gigi, dan sambungan stator.

Sebaliknya, meskipun stator dan rotor tidak bersentuhan dengan kumparan, bagian tersebut berhadapan dengan ruang udara dengan jarak sepersepuluh milimeter. Dalam kondisi ini, tahanan udara dimodelkan seperti bahan konduktivitas termal yang lemah. Meskipun demikian, resistansi termal antara rotor dan stator lemah karena sama dengan ketebalan udara dibagi dengan konduktivitas termal dan permukaan yang berhadapan. Dengan demikian, gradien suhu di dalam motor lemah dan seharusnya semua bahan aktif memiliki suhu yang sama seperti pada Persamaan 51.

$$T_a = T_{cu} \quad (51)$$

Dalam hipotesis motor tertutup, konveksi yang terjadi pada permukaan luar motor dapat dituliskan dalam Persamaan 52.

$$S_{ext} = \frac{\pi}{2} D_{ext}^2 + \pi D_{ext} L_{tot} \quad (52)$$

Oleh karena itu, suhu motor didapatkan dari Persamaan 53.

$$T_{cu} = T_{ext} + \frac{P_j + P_f + P_m}{h S_{ext}} \quad (53)$$

di mana h adalah koefisien konveksi di udara dan T_{ext} adalah suhu udara sekitar.

Pemodelan Program

Fungsi objektif yang menjadi fokus utama dalam penelitian ini adalah nilai efisiensi. Pemodelan program ini bertujuan agar nilai efisiensi dari motor tersebut meningkat. Dalam program tersebut terdiri dari beberapa perhitungan yang saling terkait hingga didapatkan nilai efisiensi. Setelah itu hasil tersebut akan dioptimasi menggunakan fungsi Fmincon dan *Genetic Algorithm*.

Pemilihan vektor desain dalam pemodelan adalah elektromekanikal, model geometri, fluks, arus, *losses* dan model termal dari motor. Vektor desain tersebut yang nantinya akan digunakan dalam mendesain motor sesuai kriteria yang diinginkan yaitu peningkatan efisiensi motor.

Pemilihan parameter desain tidaklah mudah. Ini didefinisikan oleh fenomena fisik yang diperhitungkan. Tujuannya adalah untuk merancang motor dengan efisiensi yang paling baik dan juga memenuhi kebutuhan teknis yang aman. Pertama, total massa bagian-bagian aktif dari geometri motor (M_{tot}) tidak boleh lebih dari 15 kg. Diameter luar (D_{ext}) tidak boleh lebih dari 340mm sehingga motor masuk dan pas pada pelek roda. Diameter dalam (D_{int}) harus lebih besar dari 76mm untuk alasan mekanis. Magnet harus dapat menampung arus maksimal pada setiap fasanya I_{max} 125A (lima kali arus pengenal) tanpa demagnetisasi.

Variabel desain yang digunakan sebagai parameter masukan dalam penelitian ini ada lima variabel yaitu, D_s , B_e , δ , B_d , dan B_{cs} . Parameter lainnya yang tidak menjadi variabel desain adalah $L_m = 45\text{mm}$, $e = 0.8\text{mm}$, $U_{dc} = 120\text{V}$, $B_{cr} = 1.2\text{T}$, $r_{rs} = 1.11$, dan $p = 6$. Selain itu, batasan-batasan dalam program ini harus ditetapkan dan diperiksa terlebih dahulu sebelum menjalankan program tersebut. Variabel desain yang digunakan dalam program ini ada lima variabel. Variabel desain ini yang nantinya akan digunakan sebagai *lower bound* dan *upper bound* pada program. Variabel tersebut dapat dilihat pada Persamaan 54.

$$\begin{aligned} 150\text{ mm} &\leq D_s \leq 330\text{ mm} \\ 0.9\text{ T} &\leq B_d \leq 1.8\text{ T} \\ 2.0\text{ A/mm}^2 &\leq \delta \leq 5.0\text{ A/mm}^2 \\ 0.5\text{ T} &\leq B_e \leq 0.76\text{ T} \\ 0.6\text{ T} &\leq B_{cs} \leq 1.6\text{ T} \end{aligned} \quad (54)$$

Sedangkan batasan-batasan yang digunakan dalam program ini ditunjukkan dalam Persamaan 55 berikut ini.

$$\begin{aligned} M_{tot} &\leq 15 \text{ kg} \\ D_{ext} &\leq 340 \text{ mm} \\ D_{int} &\geq 76 \text{ mm} \\ I_{max} &\geq 125 \text{ A} \\ T_a &\leq 120^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (55)$$

Batasan-batasan ini merupakan batasan nonlinear. Dalam program batasan ini dinamakan *inequality constraints*.

Hasil dan Pembahasan

Validasi Perhitungan Analitik

Pada penelitian ini dibutuhkan analisis perhitungan secara analitik untuk nantinya dibandingkan hasilnya menggunakan program perangkat lunak MATLAB. Perhitungan analitik ini bertujuan untuk mengetahui apakah program yang dijalankan sudah benar atau belum. Dalam perhitungan analitik tersebut terdapat beberapa parameter masukan yang memiliki nilai seperti ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter masukan.

| Simbol | Nilai | Nama | Satuan |
|------------|-------|--|-------------------|
| Bcr | 1,20 | Magnetic induction in the rotor yoke | T |
| Bcs | 0,80 | Magnetic induction in the stator back iron | T |
| Bd | 1,80 | Magnetic induction in the teeth | T |
| Be | 0,75 | Magnetic induction in the air gap | T |
| δ | 3 | Current density in the conductor | A/mm ² |
| Ds | 189 | Bore stator diameter | mm |
| e | 0,80 | Airgap | mm |
| Lm | 45 | Magnetic length of the motor | mm |
| p | 6 | Pole | - |
| r_{rs} | 1,11 | Ratio of the length rotor-stator | - |
| Udc | 120 | Voltage | V |
| conductors | 374 | Total number of conductors | |
| ha | 4 | Magnet width | mm |
| hd | 25 | Length of the shoe | mm |

Sifat-sifat material yang diketahui dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 2. Sifat-sifat material.

| Simbol | Nilai | Nama | Satuan |
|---------------|----------------------|--|--------|
| α_a | -5×10^{-4} | Thermal coefficient | /K |
| α_{cu} | $3,8 \times 10^{-3}$ | Thermal coefficient of copper | /K |
| Bc | 0,50 | Critical Magnetic induction in the magnets | T |
| Br | 1,04 | The remnant | T |

| | | |
|-------------------------------|--|---------------------|
| $M_{tot} \leq 15 \text{ kg}$ | <i>induction of the magnets</i> | |
| $D_{ext} \leq 340 \text{ mm}$ | <i>Induction of the specific loss qt</i> | T |
| $D_{int} \geq 76 \text{ mm}$ | <i>Density of the magnets</i> | kg/m ³ |
| $I_{max} \geq 125 \text{ A}$ | <i>Density of the rotor yoke</i> | kg/m ³ |
| $T_a \leq 120^\circ\text{C}$ | <i>Density of the copper</i> | kg/m ³ |
| | <i>Density of the stator teeth</i> | kg/m ³ |
| | <i>Frequency for the specific loss qt</i> | Hz |
| | <i>The coefficient of convection in the air</i> | W/m ² /K |
| | <i>Bulk factor of the metal sheet</i> | - |
| | <i>The leakage flux coefficient</i> | - |
| | <i>The slot filling factor</i> | - |
| | <i>Relative permeability</i> | T.m/A |
| | <i>Relative permeability of the vacuum</i> | T.m/A |
| | <i>Specific loss for a frequency ft and induction Bt</i> | W/kg |
| | <i>Resistivity of the copper</i> | Ωm |
| | <i>Tempertaure of the ambient air</i> | °C |

Struktur motor ditandai oleh hubungan antara jumlah slot dan jumlah magnet, $Ne = \left(\frac{3}{2}\right)p$. Kerugian mekanis diperkirakan $Pm = 15\text{W}$. Sementara koefisien fluks kebocoran diidentifikasi menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA), $Kfui = 0.8$. Spesifikasi motor didapatkan torsi nominal sebesar 20 Nm dan $\omega = 721\pi/30$ rad/s. Kecepatan maksimum yang dicapai saat tanpa pembebangan sebesar $\omega_{max}=1442\pi/30$ rad/s.

Dari spesifikasi diatas maka dengan persamaan-persamaan yang telah dibahas dihasilkan data hasil perhitungan seperti yang terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data hasil perhitungan analitik.

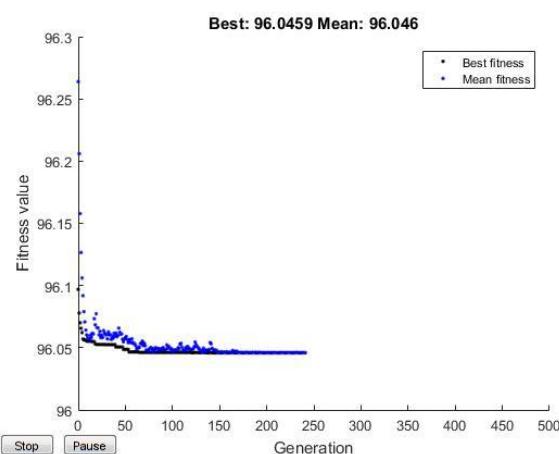
| Simbol | Nilai | Nama | Satuan |
|------------|--------|-----------------------------------|--------|
| Ne | 9 | Number of slots | - |
| α | 30 | Angle in the cross section | ° |
| β | 30 | Angle in the cross section | ° |
| α_i | 6 | Width | ° |
| Kv | 2 | Coefficient | - |
| n | 249,16 | The number of supplied conductors | - |

| | | | |
|--------|----------|--|-----------------|
| P | 168430 | <i>Electromagnetic power</i> | W |
| E | 22734000 | <i>Electromotive force</i> | N |
| Ib | 3704 | <i>Nominal current</i> | A |
| Tv | 2945 | <i>Torsion</i> | Nm |
| Senc | 92361 | <i>Total section of the slots</i> | mm ² |
| Ba | 0,84 | <i>Magnetic induction in the magnets</i> | T |
| hcr | 17,41 | <i>Length of the rotor yoke</i> | mm |
| ld | 20,62 | <i>Width of the shoe</i> | mm |
| li | 4,12 | <i>Width of the shoe</i> | mm |
| eb | 6,57 | <i>Shoe ending length</i> | mm |
| hcs | 23,18 | <i>Length of the stator yoke</i> | mm |
| Dext | 233,61 | <i>Outer diameter</i> | mm |
| Dint | 79,61 | <i>Inner diameter</i> | mm |
| hc | 3,47 | <i>Height of hold</i> | mm |
| Simbol | Nilai | Nama | Satuan |
| hi | 3,59 | <i>Central thickness of the widening of the intermediate tooth</i> | mm |
| Rtb | 17,29 | <i>Means radius of a coil end</i> | mm |
| Lds | 101,70 | <i>Medium length of a half turn</i> | mm |
| Ltot | 95,93 | <i>Total axial length of the motor</i> | mm |
| Ma | 0,92 | <i>Mass of the magnets</i> | Kg |
| Mer | 4,63 | <i>Mass of the rotor yoke</i> | Kg |
| Mcs | 2,65 | <i>Mass of the stator yoke</i> | Kg |
| Mds | 2,86 | <i>Mass of the teeth of the stator</i> | Kg |
| Mcu | 2,85 | <i>Mass of the copper</i> | Kg |
| Mtot | 14,92 | <i>Total mass</i> | Kg |
| Sext | 0,16 | <i>Convection of the outside surface of the motor</i> | m ² |
| Ta | 102,39 | <i>Temperature of the coils</i> | °C |
| Imax | 171,97 | <i>Maximum current per phase</i> | A |
| Rph | 36,13 | <i>Resistance of phase</i> | mΩ |
| Pj | 6609 | <i>Copper losses</i> | W |
| Freq | 72,10 | <i>Frequency of the fundamental</i> | Hz |
| Pf | 21,10 | <i>Iron losses</i> | W |
| Tcu | 102,40 | <i>Temperature of the motor</i> | °C |
| Eff | 91,92 | <i>Efficiency</i> | % |

dari perhitungan analitik yang telah dilakukan didapatkan nilai efisiensi sebesar 91,920%.

Program Genetic Algorithm

Penelitian ini menggunakan program *Genetic Algorithm* yang terdapat dalam *Global Optimization Toolbox* MATLAB. Setelah melakukan perhitungan analitik sebelumnya, penulis dapat membandingkan program *Genetic Algorithm* dengan perhitungan analitik sebagai acuannya. Penulis menggunakan perintah pemrograman fungsi *Genetic Algorithm* dengan perangkat lunak MATLAB 2016b. Berikut adalah hasil dari pemrograman *Genetic Algorithm* yang digambarkan dalam bentuk grafik pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik hasil optimasi F(x) dengan *genetic algorithm*

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa pada iterasi pertama nilai fungsi objekif merupakan nilai tertinggi. Grafik cenderung turun nilainya karena menyesuaikan dengan batasan-batasan, *lower bound*, dan *upper bound* yang ada. *Genetic Algorithm* ini tidak menggunakan nilai dari titik awal iterasi atau *initial point* x_0 . Namun dalam fungsi *Genetic Algorithm* ini menggunakan data populasi dan generasi yang menjadi acuan dalam algoritmanya. Populasi yang penulis atur dalam program ini adalah 250, sedangkan generasi yang diatur adalah 500. Program ini nantinya akan mencari hasil terbaik dari variabel desain yang menjadi parameter dalam program.

Penjelasan mengenai grafik pada Gambar 3 menunjukkan nilai efisiensi dalam setiap generasinya. Generasi pertama menunjukkan nilai efisiensi sebesar 96,27%. Akan tetapi nilai efisiensi tersebut semakin turun pada generasi berikutnya. Hal ini dikarenakan nilai efisiensi tersebut tinggi tetapi tidak memenuhi batasan yang telah ditetapkan sebelumnya. Pada generasi selanjutnya, algoritma terus berjalan untuk mencari hasil yang terbaik dan memenuhi batasan-batasan yang telah ditetapkan sebelumnya sampai hasilnya terlihat konvergen. Program ini nantinya akan mencari hasil terbaik dari variabel desain yang menjadi parameter dalam program.

Nilai efisiensi pada grafik Gambar 3 menunjukkan nilai yang konvergen pada saat generasi ke-247 dengan nilai efisiensi = 96,05%. Variabel-variabel yang menjadi variabel desain pada fungsi *Genetic Algorithm* tersebut setelah dijalankan algoritmanya, didapatkan nilai variabel D_s sebesar 320 mm, B_d sebesar 1,70 T, δ sebesar 5 A/mm², B_e sebesar 0,75 T, dan B_{cs} sebesar 1,60 T. Pada saat kondisi itulah didapatkan nilai efisiensi yang optimal dan memenuhi batasan-batasan yang telah ditetapkan sebelumnya dapat dilihat dalam Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan variabel desain.

| Variabel desain | Analitik | Optimasi |
|-------------------------------|----------|----------|
| D_s (mm) | 189 | 320 |
| B_d (T) | 1,80 | 1,70 |
| δ (A/mm ²) | 3 | 5 |
| B_e (T) | 0,80 | 0,76 |
| B_{cs} (T) | 0,80 | 1,60 |
| Efisiensi | 91,92 | 96,05 |

Kesimpulan

Secara perhitungan analitik diperoleh efisiensi sebesar 91,92%, dengan menggunakan fungsi *Genetic Algorithm*, nilai efisiensi yang didapatkan sebesar 96,05% atau terjadi peningkatan sebesar 4,13%.

Penghargaan

This research was partially funded by USAID under SHERA Program, Award no AID-497-A-16-00004.

Referensi

- [1] Hasnira and Istardi, D. 2014. Energy Estimation on BLDC Electric Vehicle Using Matlab. IPTEK, Journal of Proceeding Series. Vol. 1. eISSN: 2354-6026.
- [2] Hashernnia. N., and Asaei. B., 2008. Comparative Study of Using Different Electric Motors in the Electric Vehicles. Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines. Paper ID 1257.
- [3] Bharti, D., and Tiwari, P. 2018. Adaptive the Modeling of BLDC Motor Based on Fuzzy Logic and Genetic Algorithm, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol. 7, Issue 10.
- [4] Nadolski, R., et al., 2012. Utilization of BLDC motor in electrical vehicles. PRZEGŁĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 4a.
- [5] Joy, A., et al., 2018. BLDC Motor Drive for Electric Vehicles. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol. 7, Issue 4. ISSN (Print): 2320 – 3765. ISSN (Online): 2278 – 8875.
- [6] Umadevi, N., et al., (2015). Data Interpolation and Design Optimisation of Brushless DC Motor Using Generalized Regression Neural Network. J Electr Eng Technol.2015;10(1): 188-194.
- [7] Luo, H., et al., 2012. Simulation Research on Brushless DC Motor of Electric Car. 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012).
- [8] Gholamian, S. A., et al., 2011. Optimum Design of Slotted Axial Flux Internal Stator Motor Using Genetic Algorithm for Electric Vehicle. International Journal of Software Engineering & Applications (IJSEA), Vol.2, No.3.
- [9] Brisset, S. and Brochet, P. 2005. *Analytical model for the optimal design of a brushless DC wheel motor.* COMPEL:829-48.