

Perancangan *Linear Dummy Load* untuk Motor Listrik Berbasis Arus Eddy 1000 Watt

Fenty Febryanti¹, Dwi Septiyanto², Nanang Mulyono³

¹Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

E-mail : fenty.febryanti.tlis18@polban.ac.id

²Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

E-mail : dwi.septianto@polban.ac.id

³Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

E-mail : nmulyono@gmail.com

ABSTRAK

Salah satu tujuan pengujian perangkat motor listrik yaitu untuk mengetahui kurva torsi, daya, dan arus. Pengujian tersebut bisa dilakukan dengan pembebanan pada motor listrik dan bisa dilakukan dengan cara membuat beban tiruan atau *dummy load*. Efek pembebanan ini bisa didapatkan jika motor yang diuji mengalami perlambatan kecepatan putarannya. Metode pembebanannya dengan memanfaatkan karakteristik Arus Eddy. *Dummy load* ini dibuat dalam bentuk sebuah perangkat yang terdiri dari sebuah busbar, poros yang disambung dengan poros motor, piringan, kumparan stator yang dialiri arus listrik, dan modul pengatur untuk mengatur arus listrik yang masuk ke kumparan stator. Kumparan stator tersebut akan menimbulkan medan magnet yang besarnya dapat divariasikan sesuai dengan perubahan arus masuk pada kumparan stator. Piringan diletakkan diantara celah udara kumparan stator yang berperan sebagai media konduktor. Medan magnet tersebut akan menembus piringan yang arahnya berlawanan dengan putaran motor. Perbedaan arah inilah yang akan menimbulkan perlambatan kecepatan putaran motor sehingga akan terjadi efek pembebanan atau disebut dengan *dummy load*. Rancang bangun ini menghasilkan *dummy load* yang mampu membebani motor dengan kapasitas pembebanan 1000 Watt dengan torsi pengereman maksimal 13 Nm dengan karakteristik pembebanan *linier*.

Kata Kunci

Motor listrik, *dummy load*, arus Eddy, kumparan stator, *linear*

1. PENDAHULUAN

Penggunaan motor induksi tiga fasa sudah banyak digunakan untuk menggerakkan mesin-mesin beban mekanik di dunia industri. Alasannya karena penggunaan yang cukup mudah, ketahanan yang tinggi, keandalan yang tinggi juga efektifitas yang tinggi dan yang paling penting adalah biaya perawatannya yang murah. Selain itu dapat melakukan *selfstarting* dengan baik. Berdasarkan pertimbangan ekonomis dan operasional maka pemakaian motor induksi 3 fasa dalam sektor industri banyak dipilih. Pemilihan ini berdasar karena motor mempunyai konstruksi yang kokoh dan mudah perawatannya. [1]

Pada penggunaannya, motor induksi membutuhkan proses pengereman motor yang cepat, terutama pada penerapan konveyor. Pengereman motor induksi tiga fasa dapat dilakukan dengan beberapa metode diantaranya, pengereman dorongan elektro-hidrolik, pengereman arus pusar atau Arus Eddy, pengereman dinamik, dan kendali reaktor.[2]

Rem Arus Eddy biasanya dikenal sebagai penghambat listrik, sebagai sistem yang menyerap daya secara mekanis dan di konversi menjadi panas. [3] Prinsip ini bekerja dengan menginduksi arus disekitar inti kumparan saat fluks magnet melewati piringan konduktif yang berputar. Interaksi antara induksi

magnetik dengan arus induksi inilah yang akhirnya menghasilkan torsi perlambatan yang bisa digunakan sebagai rem.

Rem Arus Eddy akan bekerja sama halnya logam konduktif yang melewati medan magnet. Pada rem ini, logam konduktif berbentuk piringan berputar menembus beberapa medan magnet. Stator elektromagnet dipasang mengelilingi piringan konduktif sehingga menghasilkan medan magnet yang tegak lurus dengan penampang piringan. Arus Eddy yang timbul pada piringan konduktif tersebut menimbulkan suatu medan magnet yang menahan pergerakan dari piringan konduktif sehingga memberikan torsi pengereman. Pada medan magnet yang konstan, besar torsi pengereman meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan putar. Ketika arus yang mengalir pada elektromagnet meningkat, maka medan magnet meningkat yang akan menambah besar torsi pengereman. Torsi pengereman inilah yang akan memperlambat perputaran motor listrik dan membuat efek pembebanan pada motor yang akan diuji.

Referensi [4] Supriyo, melakukan tesis yang berjudul Perancangan dan Pembuatan Dinamometer Arus Eddy untuk Pengujian Kendaraan Bermotor Kapasitas 130 Kw. Penggunaan rem Arus Eddy dalam pembuatan dinamometer yang sederhana dan ekonomis namun

tetap memiliki akurasi pengukuran yang baik Tesis ini dilakukan untuk mengukur nilai torsi dan daya pada sebuah motor induksi tiga fasa dengan memberikan efek pembebanan dengan cara melakukan pengereman menggunakan rem Arus Eddy. Hasil yang didapatkan bahwa alat yang telah dibuat mampu membebani motor listrik dengan kapasitas 130 KW. Rancang bangun ini dibuat hanya untuk melihat nilai torsi dan daya.

Referensi [5] Dean Karnopp dalam penelitiannya memperkenalkan motor elektrodinamik linier yang terdiri dari kumparan tembaga dan magnet permanen yang dapat digunakan sebagai peredam elektromekanis untuk *suspense* kendaraan. Rancangan ini menggunakan magnet yang tidak bisa diatur kekuatan magnetnya (magnet pemanen).

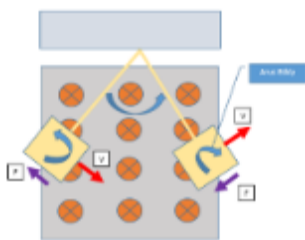
Referensi [6] Wesley Brin melakukan tesis yang berjudul *Design and Fabrication of an Eddy Current Brake Dynamometer for Efficiency Determination of Electric Wheelchair Motors*. Tesis ini dilakukan untuk merancang, dan menguji Arus Eddy dinamometer rem yang secara efektif dapat menentukan efisiensi roda yang baru diimplementasikan sistem motor hub pada kecepatan operasional. Hasilnya ditentukan bahwa motor hub roda memiliki efisiensi yang lebih tinggi tetapi hanya pada yang lebih tinggi kecepatan. Rancangan ini terfokuskan untuk melihat kinerja pada dinamometer yang telah dihubungkan dengan motor.

Dari beberapa penelitian tersebut, penulis akan merancang sebuah alat dengan konstruksi yang terfokuskan pada rancangan pembebanan motor listrik menggunakan efek Arus Eddy yang kekuatan pembebanannya bisa diatur seiring input arus dan efek pembebanannya dilihat dari nilai torsi, daya dan arus dengan mengacu beberapa konsep yang telah didapat dari karya ilmiah sebelumnya.

2. PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

2.1 Konsep Pengereman Arus Eddy

Pengereman Arus Eddy adalah suatu metode pengereman yang menyerap daya dengan menggunakan rotor yang berbahan konduktif untuk menembus suatu medan magnet, dan memunculkan suatu arus yang akan diinduksikan dalam rotor sehingga berubah menjadi panas. Arus Eddy merupakan arus berputar yang timbul akibat adanya induksi pada suatu logam konduktif serta perubahan fluks magnet atau pergerakan yang terjadi dalam suatu medan magnet. [7]



Gambar 1. Arus Eddy Akibat pergerakan Melewati Medan Magnet

Arus Eddy ini akan menimbulkan medan magnet pada lilitan dan logam piringan yang memotong medan magnet tersebut dan akan membangkitkan Arus Eddy pada piringan itu sendiri. Arus Eddy ini akan menimbulkan medan magnet yang arahnya berlawanan dengan medan magnet sebelumnya, sehingga akan menghambat gerakan putar dari poros tersebut dan memberikan efek pembebanan pada motor yang akan diuji.

Hukum Faraday tentang tegangan induksi yaitu tegangan induksi terjadi pada kumparan yang mengalami perubahan fluks magnetic dan dinyatakan dalam persamaan:

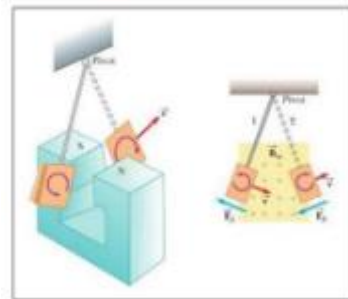
$$emf = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Keterangan:

N = banyaknya belitan pada stator
dΦ/dt = perubahan fluks magnetik

Tanda (-) pada Hukum Faraday menunjukkan perbedaan polaritas pada tegangan induksi yang mana hal inilah yang disebut dengan Hukum Lenz.

Menurut Hukum Lenz, medan magnet yang dibangkitkan oleh arus induksi akan berlawanan dengan medan magnet penginduksinya (yang memproduksinya). Oleh karena itu, medan magnet yang dihasilkan oleh Arus Eddy ditolak oleh medan magnet penginduksinya, sehingga menimbulkan gaya yang berlawanan dengan gerakan logam konduktif tersebut.



Gambar 2. Pembentukan Arus Eddy

Arus Eddy yang sedang beredar adalah arus yang diinduksi di plat konduktif oleh fluks magnet yang berubah atau bergerak melalui medan magnet. Pembentukan Arus Eddy secara konduktif melewati medan magnet. Fluks magnet yang berubah melewati pelat saat meninggalkan medan magnet menginduksi GGL yang memaksa electron bebas bergerak secara berputar-putar dan menciptakan Arus Eddy. Saat pelat memasuki medan magnet, Arus Eddy bekerja berlawanan arah jarum jam dan saat meninggalkan medan magnet, Arus Eddy bekerja searah arah jarum jam.

Sistem pengereman oleh Arus Eddy ini menggunakan piringan konduktif yang berputar pada suatu medan magnet. Arus yang muncul akibat piringan tersebut terinduksi yang arahnya tegak lurus dengan medan

magnet penghasil induksinya dan tangensial dari kecepatan putarnya.

Besarnya gaya pengereman yang timbul akibat adanya Arus Eddy bisa dihitung menggunakan persamaan:

$$F = \frac{1}{4} \frac{\pi}{\rho} D^2 dB_0^2 cv \quad (2)$$

Keterangan:

- F = gaya pengereman (Newton)
- ρ = hambatan jenis spesifik plat konduktif (Ωm)
- D = diameter inti solenoida (m)
- d = tebal piringan konduktif (m)
- B_0 = total besar medan magnet (Tesla)
- c = rasio dari total resistansi kontur
- v = kecepatan tangensial piringan konduktif (m/s)

$$c = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{4} \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{A}\right)^2 \left(\frac{A-r}{D}\right)^2} \right] \quad (3)$$

Keterangan:

- r = jarak antara pusat piringan konduktif dengan pusat inti solenoida (m)
- A = radius piringan konduktif (m)
- D = diameter inti solenoida (m)

Apabila rem Arus Eddy yang digunakan mempunyai sumber medan magnet sebesar S, maka besar medan magnet yang harus diperoleh oleh setiap sumber bisa diketahui dengan menggunakan persamaan:

$$B = \frac{B_0}{S} \quad (4)$$

Keterangan:

- B = besar medan magnet tiap solenoida (Tesla)
- B_0 = total besar medan magnet (Tesla)
- S = jumlah solenoida

Besar fluks magnet setiap solenoidanya dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\Phi = BA_g \quad (5)$$

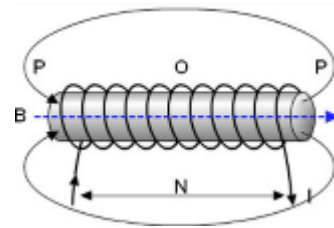
Keterangan:

- Φ = besar fluks magnet tiap solenoida (Weber)
- B = besar medan magnet tiap solenoida (Tesla)
- A_g = luas permukaan celah udara (m^2)

2.2 Medan Magnet pada Solenoida

Solenoida adalah suatu kawat yang di lilitkan pada sebuah inti membentuk sebuah kumparan kemudian

dialiri arus listrik, sehingga akan timbul medan magnet yang bisa dimanfaatkan untuk sumber medan magnet pada implementasi rem Arus Eddy.



Gambar 3. Ilustrasi Medan Magnet pada Solenoida

Dalam merancang solenoida, diperlukan perhitungan besar reluktansi total dari setiap solenoida. Reluktansi ini merupakan penjumlahan dari reluktansi inti solenoida dengan reluktansi celah udara, dirumuskan dengan persamaan:

$$R_{total} = R_{core} + R_{gap} \quad (6)$$

Keterangan:

- R_{total} = reluktansi total (At/Wb)
- R_{core} = reluktansi inti solenoida (At/Wb)
- R_{gap} = reluktansi celah udara (At/Wb)

Dengan besar reluktansi inti solenoida dihitung menggunakan persamaan:

$$R_{core} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A_c} \quad (7)$$

Keterangan:

- μ_0 = permeabilitas udara = 1.257×10^{-6} Wb/Am
- μ_r = permeabilitas inti solenoida (Wb/Am)
- A_c = luas permukaan inti solenoida (m^2)

Sedangkan besar reluktansi celah udara dapat diperoleh menggunakan persamaan:

$$R_{gap} = \frac{g}{\mu_0 A_g} \quad (8)$$

Keterangan:

- R_{gap} = reluktansi celah udara (At/Wb)
- g = panjang celah udara
- μ_0 = permeabilitas udara = 1.257×10^{-6} Wb/Am
- A_g = luas permukaan celah udara (m^2)

Banyak lilitan tiap solenoid perlu diperhitungkan sehingga arus yang dibutuhkan untuk melewati stator induksi dapat dihitung untuk memperoleh nilai fluks magnet yang diinginkan guna menentukan kekuatan

pengereman. Arus yang dibutuhkan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$I = \frac{\Phi R_{total}}{N} \quad (9)$$

Keterangan:

- I = besar arus yang mengalir pada kumparan solenoid (Ampere)
- Φ = besar fluks magnet tiap solenoida (Weber)
- R_{total} = reluktansi total (At/Wb)
- N = banyak lilitan

Catu daya yang diperlukan untuk mengalirkan arus tersebut bisa diketahui dengan menghitung besar resistansinya. Besar resistansi pada solenoida dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (10)$$

Keterangan:

- R = resistansi kumparan (Ω)
- ρ = resistivitas material kumparan (Ωm)
- L = panjang solenoida yang di lilit (m)
- A = luas penampang kawat (m^2)

Setelah diperoleh resistansi kmparan dan besar arus tiap solenoidanya, maka tegangan catu daya yang disuplai bisa diketahui menggunakan persamaan:

$$V = IR \quad (11)$$

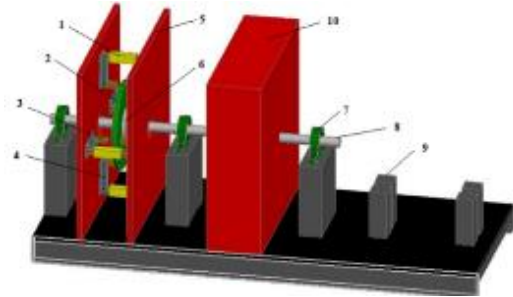
Keterangan:

- V = tegangan (Volt)
- I = arus (Ampere)
- R = resistansi (Ω)

2.3 Perancangan *Electric Motor Dummy Load*

Setelah dilakukan perhitungan, besar gaya pengereman yang dibutuhkan untuk memberikan efek pemebebanan minma; pada motor listrik adalah sebesar 69.9 Newton. Material bahan yang dipilih untuk bahan piringan konduktif adalah bahan alumunium dengan ketebalan 0.5 cm karena bahan ini memiliki nilai konduktivitas yang tinggi. Sedangkan untuk besar medan magnet minimal yang dibutuhkan yaitu 4.2 Tesla. Jumlah solenoid yang dipilih sebanyak 4 buah solenoid, sehingga besar medan magnet tiap solenoidnya sebesar 1 Tesla. Dengan luas inti magnet dirancang sebesar 1.125 cm², maka besar fluks magnet yang ditimbulkan dari tiap statornya adalah 6.5 x 10⁻⁵ Weber. Reluktansi inti solenoida yang digunakan adalah 7.6 x 10⁶ At/Wb. Jika jumlah lilitan adalah 230 lilitan, maka arus yang mengalir ke solenoida sebesar 2.21 Ampere. Resistansi kawat yang digunakan adalah 10.2 Ohm. Sehingga

tegangan minimal catu daya yang dibutuhkan sebesar 22 Volt dengan daya input sebesar 50 Watt. Berdasarkan hasil perhitungan diatas, dirancanglah sebuah *dummy load* dengan konstruksi seperti yang terlihat pada ilustrasi dibawah ini.



Gambar 4. Konstruksi *Dummy Load*

Dummy load berfungsi sebagai alat untuk pengujian motor listrik. *Dummy load* akan memberikan pembebanan secara tidak langsung sehingga kurva torsi terhadap kecepatan putar bisa didapatkan. Oleh karena itu kuat efek pembebanan pada motor listrik ini harus dikontrol dengan cara mengatur kekuatan magnet pada solenoida yang selanjutnya akan diamati kecepatan putar pada selang waktu tertentu, dan didapatkanlah kurva karakteristik pembebanan motor. Untuk mengatur besarnya gaya pengereman, maka besar medan magner yang ditimbulkan oleh stator bisa diatur dengan cara memvariasikan besar arus yang masuk ke solenoid. Besar variasi arus ini bisa dilakukan dengan mengubah voltase yang diberikan oleh catu daya. Dengan demikian, besarnya voltase pada catu daya haruslah bisa diatur. Besarnya arus yang masuk ke kumparan akan diatur oleh voltage current converter.

Pengaturan tegangan pada catu daya dilakukan menggunakan catu daya yang bisa divariasikan voltasenya. Dari variasi voltase ini, nantinya arus akan bervariasi dan akan menyebabkan kecepatan putar motor berkurang dan torsi pengeremannya semakin tinggi. Catu daya ini terdiri dari modul MCP4725 yang keluarannya sumber tegangan kemudiann diubah menjadi sumber arus menggunakan konverter. Converter ini terdiri dari sebuah potensiometer, op amp, transistor 2N3055, dan sebuah resistor.

Modul MCP4725 adalah sebuah perangkat pengubah sinyal digital menjadi sinyal analog atau biasa disebut *Digital to Analog Converter (DAC)*. Komunikasi antara MCP4725 dengan perangkat kontrol lainnya yaitu komunikasi 12C. Sinyal analog dari MCP4725 ini kemudian masuk ke pengubah tegangan untuk diubah menjadi sumber tegangan yang bisa divariasikan. B

Hal penting yang perlu diketahui dalam perancangan ini adalah besarnya torsi pengereman saat kecepatan putarnya terendah. Sebab besar torsi pengereman pada rem Arus Eddy naik sejalan dengan naiknya kecepatan putar motor. Kecepatan putar paling lambat dari motor ini sebaiknya sama dengan kecepatan putar terendah motor pada biasanya. Untuk mendukung keberhasilan

pengukuran, maka alangkah lebih baik torsi pengereman saat kondisi kecepatan motornya rendah sama dengan torsi paling besar dari motor walaupun torsi tersebut seharusnya bisa dihasilkan oleh kecepatan putar motor yang lebih tinggi.

Pengukuran daya dan pengamatan kurva karakteristik motor dilakukan dengan langkah:

1. Nyalakan motor tanpa dikopel dengan *dummy load*
2. Catat kecepatan putar beserta torsi
3. Matikan motor
4. Kopel motor dengan *dummy load*, lalu nyalakan motor
5. Jangan atur dulu besar pembebanan pada *dummy load*
6. Langsung ukur kecepatan putar dan torsi
7. Atur besar efek pengereman untuk mendapatkan data kecepatan putar dan torsi
8. Buatlah kurva dari data yang telah diambil

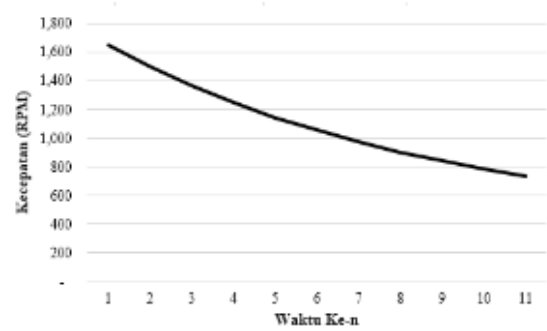
3. DISKUSI DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan konstruksi *dummy load* pada subbab 2.3, dilakukanlah simulasi pengereman Arus Eddy menggunakan *software* COMSOL Multiphysics 5.6. Dengan memasukan parameter yang telah dihitung, didapatkanlah data torsi dan kecepatan motor dengan memvariasikan arus masuk ke kumparan. Data tersebut dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Data Hasil Simulasi Arus Eddy Menggunakan *software* COMSOL Multiphysics 5.6.

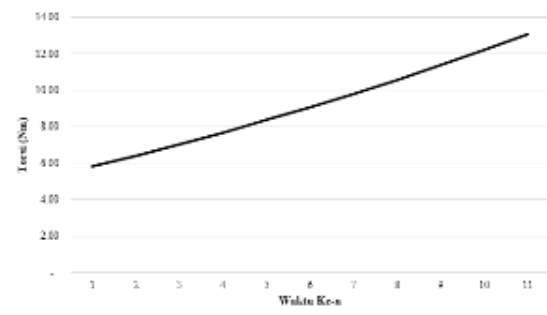
No	Arus (A)	Torsi (Nm)	Kecepatan (RPM)
1	1.96	5.80	1,647.76
2	2.06	6.39	1,494.57
3	2.15	7.02	1,361.79
4	2.25	7.67	1,245.95
5	2.35	8.35	1,144.28
6	2.45	9.06	1,054.57
7	2.55	9.80	975.01
8	2.64	10.57	904.12
9	2.74	11.36	840.70
10	2.84	12.19	783.72
11	2.94	13.05	732.34

Berdasarkan data torsi dan kecepatan pada tabel 1 didapatkanlah kecepatan dan torsi kecepatan terhadap waktu seperti pada gambar 5 dan 6.



Gambar 5. Kurva Kecepatan terhadap Waktu

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa seiring dengan bertambahnya arus masuk ke kumparan, kecepatan motor juga akan terus melambat



Gambar 6. Kurva Torsi terhadap Waktu

Sedangkan kurva karakteristik torsi terhadap kecepatan yang dihasilkan memenuhi persamaan *linier* berikut:

$$y = mx + b \quad (12)$$

Keterangan:

- y = torsi pengereman yang akan ditentukan
- m = perubahan torsi dibagi perubahan kecepatan
- x = kecepatan motor terukur
- b = nilai torsi maksimal

b adalah torsi yang ditentukan, dan dalam penelitian ini, torsi maksimal yang ingin dihasilkan adalah 13 Nm dan kecepatan motor dari efek pembebanan maksimal yang ingin dicapai sebesar 732 RPM.

Hubungan berbanding terbalik antar torsi dan kecepatan adalah garis lurus menurun dengan kemiringan negative. Kurva torsi-kecepatan dimulai dari singgungan di sumbu y yang dimana torsi maksimum dan kecepatannya nol. Saat torsi maksimum motor berjalan pada tegangan nominal, garis lurus miring sampai menyinggung sumbu x yaitu pada saat torsi nol dan kecepatan maksimum. Pada keadaan ini motor berjalan pada tegangan nominal dan beban nol.

Pengujian pembebanan motor listrik menghasilkan kurva karakteristik pembebanan yang *linier* sesuai dengan persamaan (12). Kecepatan motor terus melambat seiring dengan pertambahan arus yang masuk ke kumparan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan perancangan *Linier Dummy Load* yang mampu membebani motor listrik 1 fasa dengan daya 1000 Watt. Dari perancangan dan simulasi ini didapatkan kecepatan dari pembebanan maksimalnya yaitu 732 RPM dan torsi maksimal adalah 13 Nm. Artinya pembebanan berhasil karena adanya perlambatan kecepatan putar motor.

Kurva karakteristik motor bila dibandingkan saat sebelum motor dibebani bisa digunakan sebagai dasar untuk memilih optimasi yang tepat sehingga didapatkan pembebanan motor listrik yang minim gesekan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Tim peneliti mengucapkan terimakasih kepada Politeknik Negeri Bandung, melalui Wakil Direktur Akademik atas bantuan pendanaan penyusunan tugas akhir nomor B/402/PL1.R1/EP.00.08/2021 kelompok A1.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Joko Windarto, dkk .2002. ‘Variabel Frekuensi Control dengan Phase Locked Loop sebgai PengaturKecepatan Motor Induksi Tiga Fasa’, Seminar Mesin Listrik dan Elektronika Daya, Yogyakarta
- [2] Soelaiman dan Mabuchi Magariswa, 1984. *Mesin Tak Serempak dalam Praktek*. Jakarta: PT Pradnya Paramita
- [3] J. H. Wouterse. 1991. ‘Critic speed of eddy current brake with widely separated soft iron poles in IEE Proceedings B’. *Electric Power Applications*. Vol. 138. No. 4. hal. 153-158.
- [4] Supriyo. 2012. *Pembuatan Dinamometer Arus Eddy untuk Pengujian Kendaraan Bermotor Kapasitas 130 KW*. Universitas Diponegoro.
- [5] Karnopp, Dean. 2007. ‘Permanent Magnet Linear Motors Used as Variable Mechanical Dampers for Vehicle Suspensions’. *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. Vol. 18. No.4. Hal. 187-200.
- [6] Brin, Wesley. 2013. *Design and Fabrication of an Eddy Current Brake Dynamometer for Efficiency Determination of Electric Wheelchair Motors*, Wright State University.
- [7] C.T. David Jose. 2002. *Design of an Innovative Car Braking System using Eddy Current*. Instituto Superior Technic.