

Desain dan Simulasi *Solenoid* Dua Kumparan sebagai Alat Penendang

Purnomo Sejati¹, Anthon de Fretes¹, Obed Tetriscio Torar¹

¹Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya
Jalan Raya Cisauk, BSD City, Tangerang Selatan, Banten 15345
E-mail: purnomo.sejati@atmajaya.ac.id

ABSTRAK

Pada penelitian ini, sebuah purwarupa solenoid dua kumparan dirancang dan disimulasikan. Solenoid ini merupakan aktuator yang dirancang untuk kompetisi robot sepak bola dengan kecepatan plunger yang diharapkan mencapai 10 m/s. Pada penelitian lain, dibuktikan bahwa solenoid adalah mekanisme penendangan terbaik. Meskipun demikian, solenoid tersebut dibuat dengan satu kumparan sedangkan pada penelitian ini solenoid memiliki dua kumparan. Solenoid pada penelitian ini dibuat dengan dua kumparan agar dapat menghasilkan dua gerakan tendang yang berbeda. Rancangan penelitian solenoid diawali dengan perhitungan kemudian divalidasi dengan software simulasi FEMM untuk satu maupun dua kumparan. Dari perbandingan hasil perhitungan medan magnet antara simulasi menggunakan perangkat lunak FEMM didapatkan bahwa keduanya memiliki hasil yang mendekati dengan akurasi 0,01 Tesla.

Kata kunci: *solenoid dua kumparan, alat penendang, simulasi FEMM*

ABSTRACT

In this study, a two-coil solenoid prototype was designed and simulated. This solenoid was an actuator designed specifically for the soccer robot competition so that the plunger speed was desired to reach 10 m/s. In other researches, solenoids were made and proven as the best kicking mechanism. Nevertheless, the solenoid was made with one coil whereas in this study the solenoid had two coils. Solenoid in this study was made with two coils in order to produce two different kick movements. The solenoid research design began with calculations then validated with FEMM simulation software for one and two coils. From the comparison of calculations between the simulations using the FEMM software it was found that both had close results with up to 0.01 Tesla difference.

Keywords: *two-windings solenoid, kicking device, FEMM*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi robot terjadi sangat cepat pada berbagai bidang, seperti di bidang industri manufaktur, penjelajahan luar angkasa, hingga penyaji makanan di restoran [1, 2]. Dalam bidang olahraga, saat ini robot sepak bola juga mengalami perkembangan yang pesat. Robot ini diteliti dan dikembangkan untuk dapat bertanding dengan manusia pada tahun 2050 [3]. Tak hanya itu, kontes robot sepak bola pun banyak diselenggarakan baik di tingkat nasional dan internasional [4].

Dalam kontes robot sepak bola tersebut, terdapat beberapa divisi yang biasanya dipertandingkan, yaitu robot

berkaki, robot beroda menengah dan robot beroda junior [5]. Robot sepak bola beroda perlu dirancang supaya dapat menendang bola ke arah gawang lawan. Untuk dapat menendang, robot tersebut perlu dilengkapi dengan sebuah alat atau mekanisme penendang. Penelitian yang dilakukan oleh Craft menciptakan mekanisme penendang dengan kombinasi bahan logam dan motor penggerak [6]. Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Liu menggunakan silinder pneumatik yang dilengkapi dengan kompresor udara sebagai mekanisme penendang [7].

Solenoid bisa juga dijadikan sebagai mekanisme penendang menggantikan motor penggerak dan

kompresor udara. Beberapa penelitian telah menggunakan *solenoid* sebagai mekanisme penendang [8, 9,10, 11, 12]. *Solenoid* tersebut dibuat dengan satu kumparan dan sumber tegangan yang digunakan adalah tegangan yang disimpan pada kapasitor. *Solenoid* melakukan penendangan dengan ujung *plunger* yang mengentak akibat gaya yang dihasilkan medan magnet pada kumparan. Jarak penendangan tersebut hanya satu sesuai dengan panjang *plunger* sehingga penendangan bola juga terbatas satu gerakan [13].

Robot pada kontes sepak bola diharapkan dapat bekerja sama untuk melakukan strategi sehingga mampu menjuarai permainan [14]. Oleh karena itu, tendangan jarak pendek dan jauh diperlukan. Untuk mewujudkan hal tersebut diperlukan juga alat penendang yang mampu bekerja dengan dua jenis gerakan. Pada penelitian ini, *solenoid* dua kumparan dirancang untuk merealisasikan hal tersebut.

Perancangan *solenoid* dua kumparan dilakukan untuk menghasilkan gerakan dengan kecepatan 10 m/s. Kecepatan tersebut dapat dihasilkan dengan memperhatikan parameter jumlah lilitan, tegangan sumber, hambatan jenis kawat, dan desain kerangka. Jumlah lilitan didapatkan dengan persamaan pada penelitian [15]. Kawat kumparan yang dipakai bermaterial tembaga dan dipilih berdiameter 0,5 mm serta disesuaikan dengan tabel *American Wire Gauge* (AWG) dengan nomor 24. Sumber tegangan ditentukan adalah 65V. Dan kerangka dibuat dengan material *Poly Lactide Acid* (PLA) agar mudah dalam proses pembuatan menggunakan mesin 3D Printer.

Medan magnet dari *solenoid* dua kumparan dihitung dengan persamaan pada penelitian [15]. Selain itu, *solenoid* satu kumparan juga dihitung dan bernilai. Untuk mengonfirmasi hasil tersebut digunakan software *FEMM* (*Finite Element Method Magnetic*).

2. METODOLOGI PENELITIAN

Tempat dan Waktu

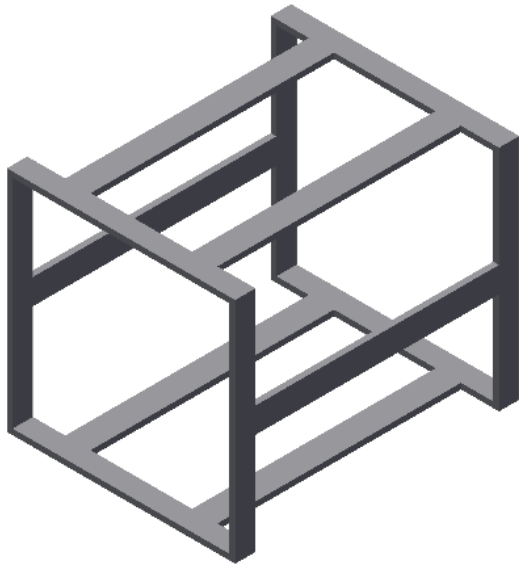
Perancangan *solenoid* dua kumparan sebagai alat penendang bola dikerjakan di laboratorium, dengan waktu pengerjaan empat minggu. Alat ini kemudian mulai dilakukan pembuatan untuk dilakukan pengujian dan penelitian.

Tabel 1. Daftar kehendak rancang bangun *solenoid* dua kumparan.

| Karakteristik | D/W | Persyaratan |
|---------------|-----|--|
| Geometri | D | Dimensi <i>solenoid</i> disesuaikan hasil perhitungan |
| | W | <i>Solenoid</i> untuk robot diproduksi secara umum |
| Material | D | Material dasar <i>solenoid</i> bahan yang bersifat kokoh |
| | D | Ringan, anti karat, murah, dan mudah didapat |
| Sumber Energi | D | Pergerakan <i>solenoid</i> berjalan stabil |
| | W | Murah dan mudah perawatan |
| Operasi | W | Pengoperasian dengan robot secara langsung |
| | W | Tingkat kegagalan minimal |

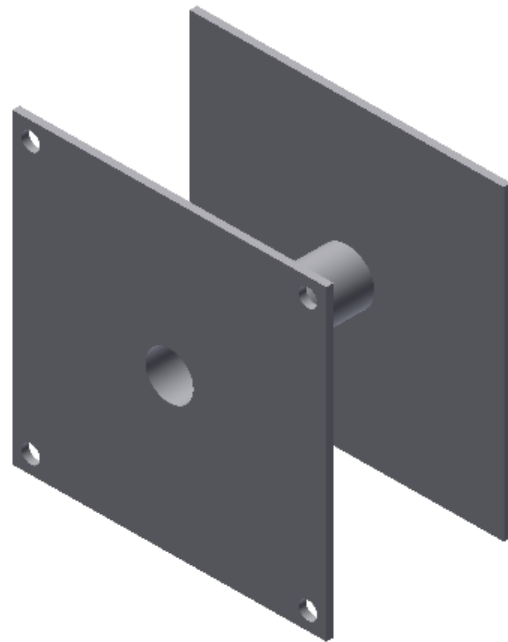
Metode Perancangan

Rancangan *solenoid*, sumber energi dan pengoperasian akan dijabarkan dalam daftar kehendak pada Tabel 1. Daftar kehendak berisikan persyaratan karakteristik yang harus dipenuhi (*demand*) dan tentatif (*wish*) yang dibuat berdasarkan [16].

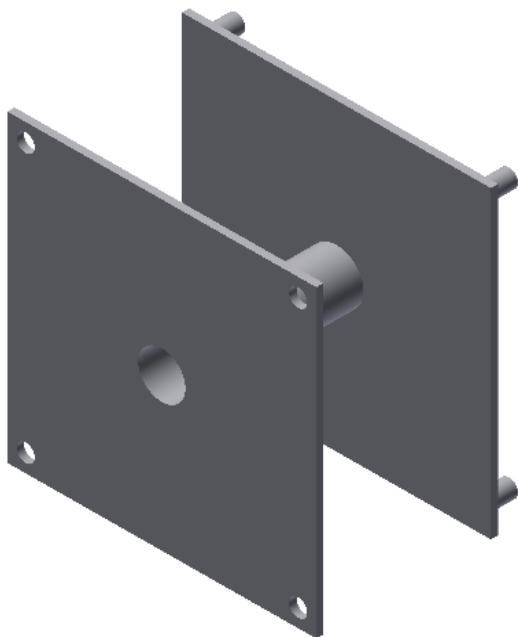


Gambar 1. Penutup *solenoid*

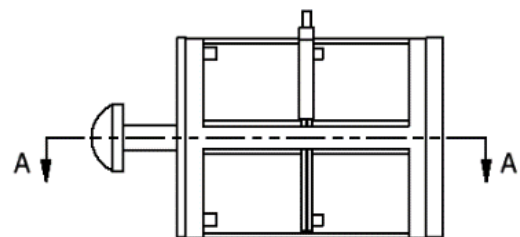
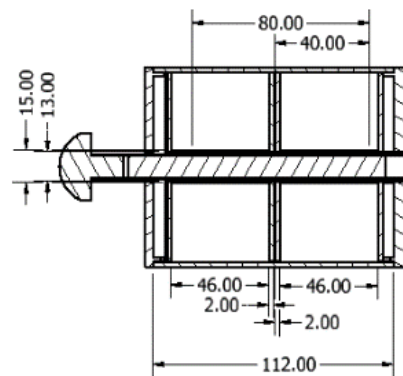
secara berurut dapat dilihat pada Gambar 2, Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.



Gambar 3. Rancangan dudukan kumparan dua



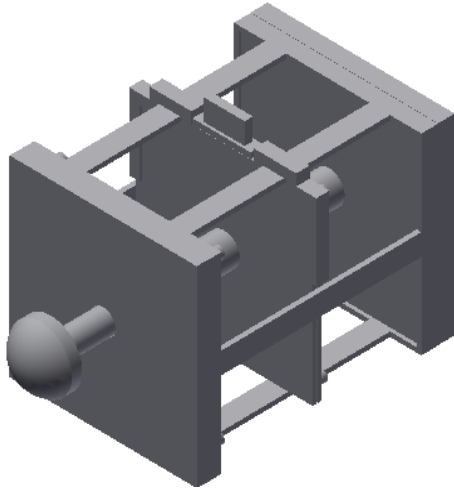
Gambar 2. Rancangan dudukan kumparan satu



Gambar 4. Gambar teknik *assembly solenoid*

- **Holder Kumparan**

Holder kumparan adalah tempat kumparan kawat tembaga dengan dimensi yang disesuaikan dengan kebutuhan jumlah 6021 dan 2657 lilitan. *Holder* kumparan bermaterial dasar *Poly Lactide Acid (PLA)* dibuat menggunakan mesin *3D-Printer*. Rancangan dudukan kumparan berserta dengan *assembly*



Gambar 5. Rancangan *assembly solenoid* dua kumparan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Energi Kinetik

Perhitungan energi kinetik yang dibutuhkan untuk mencapai kecepatan aktuator sebesar 10 m/s.

$$E.K. = \frac{1}{2} m_p \cdot v_p^2 \quad (1)$$

E.K = Energi Kinetik [J]

m_p = massa *plunger* [Kg]

V_p = kecepatan *plunger* [m/s]

Dalam rancangan ini, *solenoid* dua kumparan dirancang untuk mencapai kecepatan *plunger* 10 m/s. Saat bekerja hanya satu kumparan, kecepatan yang diinginkan adalah 5 m/s.

- Kondisi Dua Kumparan

Keterangan:

Massa *Plunger* = Massa total

$M_{total} = M_{PLA} + M_{Magnet}$

$M_{Plunger} = 122,5 \text{ gr} = 0,1225 \text{ Kg}$

Kecepatan *plunger* = 10 m/

$$E.K. = \frac{1}{2} (0,1225) 10^2 = 6,125 \text{ J}$$

- Kondisi Satu Kumparan

Keterangan:

Massa *Plunger* = Massa total

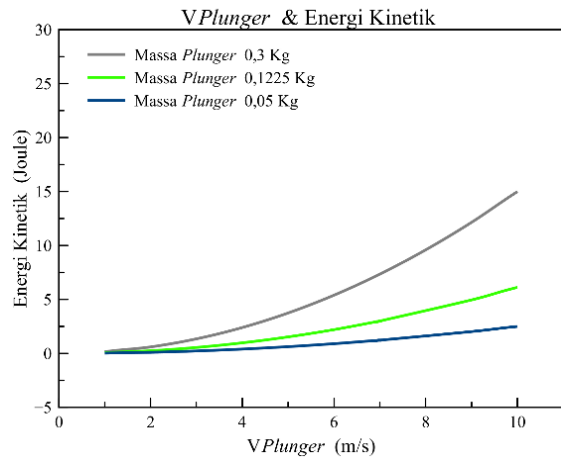
$M_{total} = M_{PLA} + M_{Magnet}$

$M_{Plunger} = 122,5 \text{ gr} = 0,1225 \text{ Kg}$

Kecepatan *plunger* = 5 m/s

$$E.K. = \frac{1}{2} (0,1225) 5^2 = 1,531 \text{ J}$$

Energi kinetik *plunger* ketika menggunakan dua dan satu kumparan melalui persamaan (1) sebesar 6,125 J dan 1,531 J. Grafik kecepatan *plunger* terhadap energi kinetik dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik hubungan kecepatan *plunger* & energi kinetik

Menentukan Besar Gaya

$$F = \frac{W}{S} \quad (2)$$

F = Gaya [N]

W = Usaha [Joule]

S = Panjang lintasan/*stroke* [m]

Perhitungan:

- Kondisi Satu Kumparan

Keterangan:

$W = 6,125 \text{ Joule}$

$S = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$

$$F = \frac{6,125}{0,08} = 76,563 \text{ N}$$

- Kondisi Dua Kumparan

Keterangan:

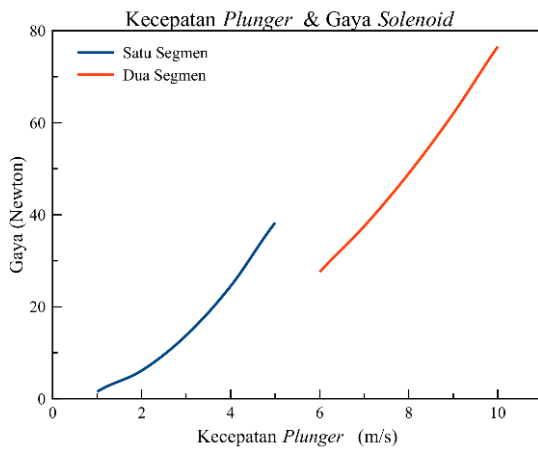
$W = 6,125 \text{ Joule}$

$S = 40 \text{ mm} = 0,04 \text{ m}$

$$F = \frac{1,531}{0,04} = 38,281 \text{ N}$$

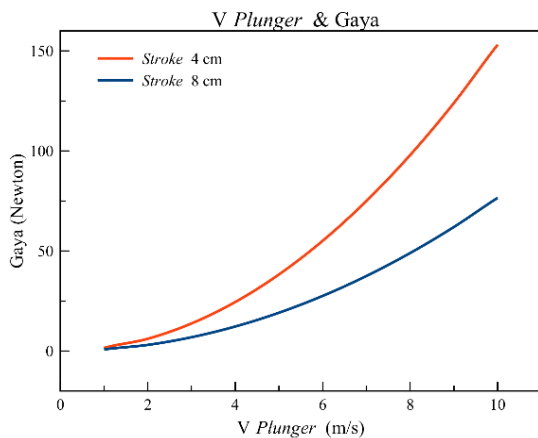
Gaya *plunger* melalui persamaan (2) menggunakan dua kumparan dengan panjang *stroke* 80 mm untuk mencapai kecepatan 10 m/s yaitu sebesar 76,563 N. Gaya *output plunger* menggunakan satu kumparan dengan panjang *stroke* 40 mm untuk mencapai 5 m/s yaitu sebesar 38,281 N. Grafik hubungan kecepatan

plunger dan gaya, berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan (1) dan (2) dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik kecepatan *plunger* terhadap gaya solenoid

Gambar 8 adalah grafik hubungan kecepatan *plunger* dan gaya *plunger* dengan dua kumparan.



Gambar 8. Grafik kecepatan *plunger* terhadap gaya solenoid (dua macam stroke)

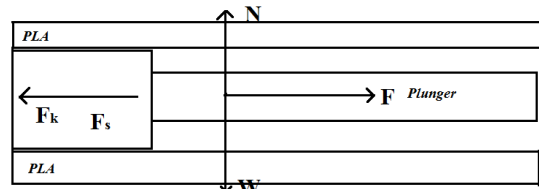
Gaya Normal

- Gaya tekan:
$$W = m_p \times g \quad (3)$$

W = Gaya tekan ke permukaan [N]
 m_p = massa *plunger* [Kg]
 g = percepatan gravitasi [m/s^2]

Perhitungan:
 $W = (0,1225)(10) = 1,225 \text{ N}$

Gaya tekan *plunger* pada permukaan *PLA* dibutuhkan menggunakan persamaan (3) dengan tujuan mendapatkan gaya normal. Gaya tekan *plunger* ke permukaan *PLA* sebesar 1,225 N. Ilustrasi hubungan gaya dorong, normal, dan gaya gesek ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Ilustrasi Hubungan Gaya Dorong, Normal, dan Gesek

- Gaya Normal *Plunger*:
$$\begin{aligned} \Sigma F_y &= 0 \ (\uparrow +) \\ 0 &= N - W \\ W &= N \\ N &= 1,225 \text{ N} \end{aligned} \quad (4)$$

Gaya normal *plunger* melalui persamaan (4) dibuktikan sama dengan gaya tekan pada permukaan *PLA* yaitu sebesar 1,225 N.

Gaya Gesek

Gaya gesek terdapat dua jenis yaitu gesek statis dan gesek kinetik.

- Gaya gesek statis:
$$f_s = \mu_s \cdot N \quad (5)$$

F = Gaya gesek statis [N]
 μ_s = Koefisien gesek statis plastik pada plastik
 N = Gaya Normal [N]

Perhitungan:
 $f_s = (0,4)(1,225)$
 $f_s = 0,49 \text{ N}$

Gaya gesek statis *plunger* melalui persamaan (3.5) dihasilkan sebesar 0,4N.

Gaya gesek kinetik:
$$f_k = \mu_k \cdot N \quad (6)$$

f_s = Gaya gesek kinetik [N]
 μ_k = Koefisien gesek kinetik lastik pada plastik
 N = Gaya normal [N]

Perhitungan:

$$f_k = (0,3) \cdot (1,225)$$

$$f_k = 0,3675 \text{ N}$$

Gaya gesek kinetik *plunger* melalui persamaan (6) didapatkan sebesar 0,3675 N. Gaya diperlukan *plunger* melalui persamaan (2) telah didapatkan sebesar 76,563 N untuk dua kumparan dan 38,281 N satu kumparan, membuktikan melebihi gaya gesek statis dan kinetik, sehingga dapat menggerakkan serta menjaga *plunger* tetap bergerak.

Luas Permukaan *Plunger*

$$S = \frac{\pi(D+d)}{2} l \quad (7)$$

D = Diameter luar *plunger* [m]

d = Diameter dalam *plunger* [m]

l = panjang *plunger* [m]

Perhitungan :

$$S = \frac{\pi(0,015 + 0,013)}{2} (0,125)$$

$$S = 0,00412 \text{ m}^2$$

Luas permukaan *plunger* yang dipakai berdasarkan persamaan (7) dan disesuaikan dengan dimensi rancangan adalah 0,00412 m².

Jumlah Lilitan

$$N = \frac{F(2(I_2 + I_{eq} + (\mu_r - 1)x)^2)}{S i^2 \mu_r^2 \mu_o} \quad (8)$$

F = gaya yang dihasilkan *solenoid* [N]

S = luas permukaan *plunger* [m²]

N = jumlah lilitan

i = arus listrik [A]

μ_o = permeabilitas ruang hampa [Wb/Am]

μ_r = permeabilitas

l_2 = panjang kumparan [m]

l_{eq} = panjang rangka *solenoid* [m]

Perhitungan:

• Kondisi Dua Kumparan :

$$N = \frac{F(2(I_2 + I_{eq} + (\mu_r - 1)x)^2)}{S i^2 \mu_r^2 \mu_o}$$

$$N = \frac{(76,563)(2(92 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-2} + (1,05 - 1)0,08)^2)}{(0,00412)(2)^2(1,05)^2(1,257 \times 10^{-6})}$$

$$N = 8675$$

Jumlah lilitan yang dibutuhkan dua kumparan *solenoid* menggunakan persamaan (8) dengan panjang *stroke* 80 mm yaitu sebanyak 8675.

• Kondisi satu kumparan:

$$N = \frac{F(2(I_2 + I_{eq} + (\mu_r - 1)x)^2)}{S i^2 \mu_r^2 \mu_o}$$

N

$$= \frac{(38,281)(2(92 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-2} + (1,05 - 1)0,04)^2)}{(0,00412)(2)^2(1,05)^2(1,257 \times 10^{-6})}$$

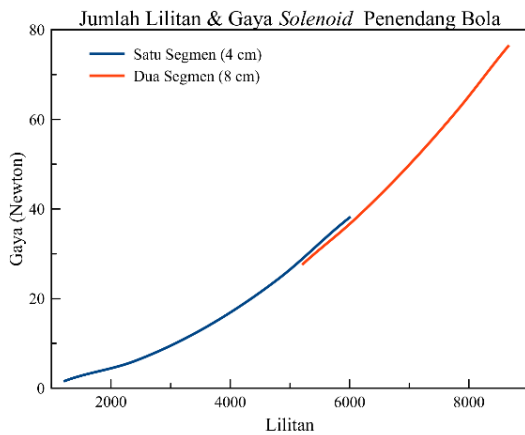
$$N = 6021$$

Jumlah lilitan yang dibutuhkan satu kumparan *solenoid* dihitung dengan persamaan (8) dengan panjang *stroke* 40 mm yaitu sebanyak 6021. Tabel 2. menunjukkan permeabilitas relatif material yang digunakan pada *plunger*. Grafik jumlah lilitan terhadap gaya dapat dilihat pada Gambar 10.

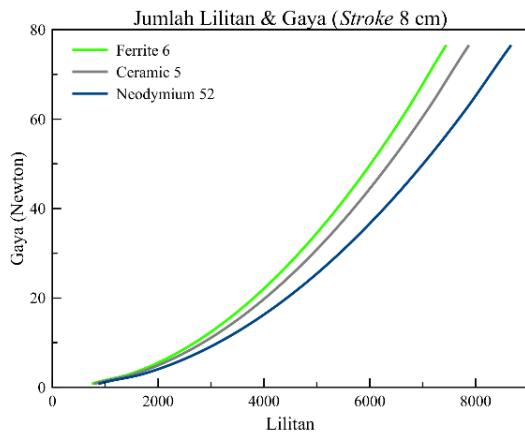
Tabel 2. Permeabilitas relatif

| Material Magnet Permanen | Permeabilitas Relatif (μ_r) |
|--------------------------|-----------------------------------|
| Neodymium 52 (NdFeB) | 1,05 |
| Ceramic 5 | 1,886 |
| Ferrite 6 (AlNiCo) | 3,3 |

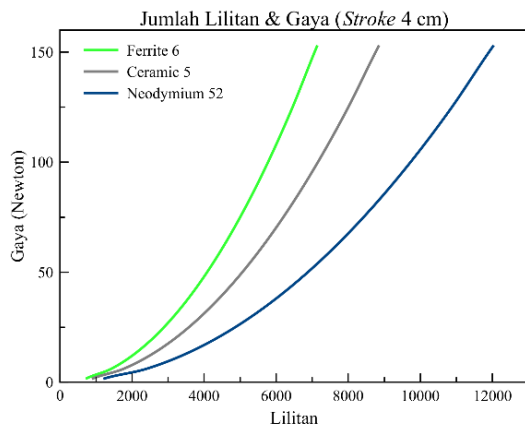
Gambar 11 dan Gambar 12 adalah grafik hubungan jumlah lilitan dan gaya *plunger* dengan panjang *stroke* yang berbeda dan material dasar magnet permanen.



Gambar 10. Grafik lilitan gaya solenoid penendang bola



Gambar 11. Grafik lilitan dan gaya



Gambar 12. Grafik lilitan & gaya

Panjang Kawat

$$l_w = \pi \left[\frac{d_1 + d_2}{2} \right] N \quad (9)$$

- d_1 =Diameter luar kumparan [mm]
- d_2 =Diameter dalam kumparan [mm]
- N = jumlah lilitan

Perhitungan :

- Kondisi Dua Kumparan:

$$l_w = \pi \left[\frac{0,015 + 0,013}{2} \right] 8675$$

$$l_w = 381,94 \text{ m}$$

Panjang kawat dua kumparan solenoid menggunakan persamaan (9) dibutuhkan sepanjang 381,94 m.

- Kondisi Satu Kumparan:

$$l_w = \pi \left[\frac{0,015 + 0,013}{2} \right] 6021$$

$$l_w = 264,91 \text{ m}$$

Panjang kawat satu kumparan solenoid menggunakan persamaan (9) dibutuhkan sepanjang 264,91 m.

Fluks Magnet Solenoid

$$\phi = \frac{NI \mu_r \mu_o S}{l_2 + l_{eq} + x(\mu_r - 1)} \quad (10)$$

- ϕ = Fluks magnet [Wb]
- N = jumlah lilitan
- μ_r = Permeabilitas relatif neodymium
- μ_o = Permeabilitas ruang bebas
- S = Luas permukaan plunger [m²]
- l_2 = panjang lilitan [m]
- l_{eq} = panjang keseluruhan [m]
- x = panjang stroke [m]

- Kondisi Dua Kumparan:

$$\phi = \frac{(8678)(2)(1,05)(1,257 \times 10^{-6})(0,00412)}{(92 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-2} + (1,05 - 1)0,08)}$$

$$\phi = 0,000458 \text{ Wb}$$

Fluks magnet dua kumparan menggunakan persamaan (10) sebesar 0,000458 Wb.

- Kondisi Satu Kumparan :

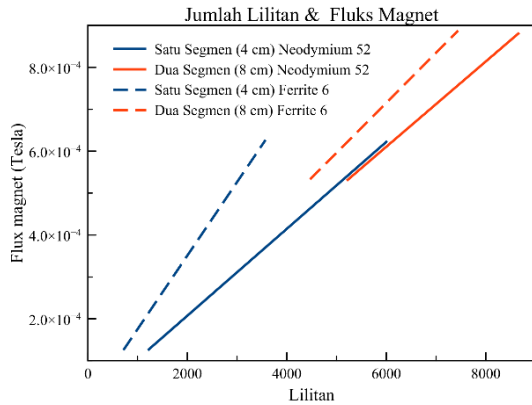
$$\phi = \frac{(8678)(2)(1,05)(1,257 \times 10^{-6})(0,00412)}{(92 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-2} + (1,05 - 1)0,04)}$$

$$\phi = 0,000321 \text{ Wb}$$

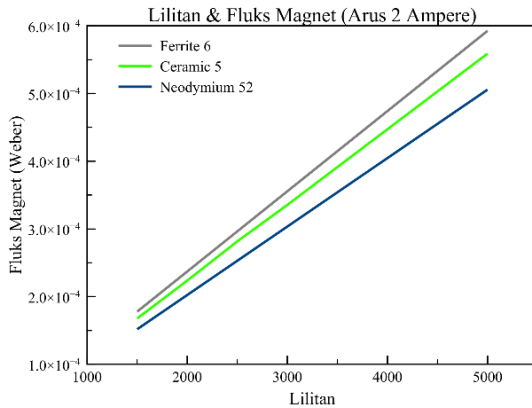
Fluks magnet satu kumparan menggunakan persamaan (10) sebesar 0,000321 Wb.

Gambar 13. pengaruh jumlah lilitan terhadap fluks magnet pada solenoid penendang bola, dengan

menggunakan neodymium 52 sebagai material dasar *plunger*.



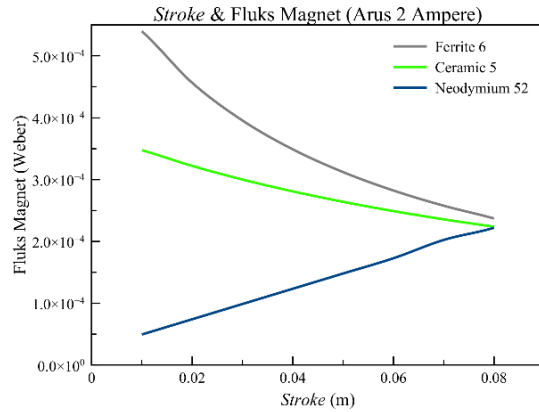
Gambar 13. Jumlah lilitan terhadap fluks magnet solenoid dua kumparan



Gambar 14. Jumlah lilitan terhadap fluks magnet

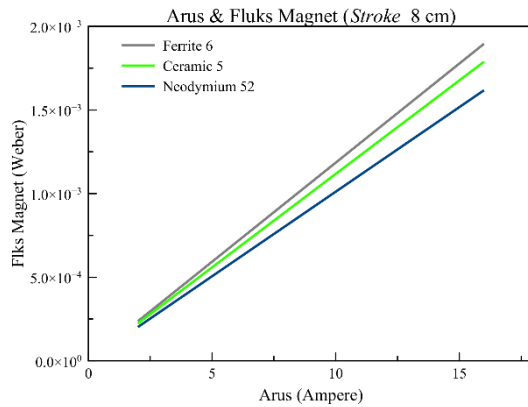
Gambar 14, Gambar 15, dan Gambar 16 merupakan grafik yang memiliki perbedaan ukuran parameter dengan tujuan menginformasikan pengaruh 3 macam material dasar magnet permanen yaitu Ferrite 6, Ceramic 5, dan Neodymium 52 terhadap fluks magnet solenoid. Gambar 14 adalah grafik hubungan jumlah lilitan terhadap fluks magnet dengan dimensi panjang *stroke* 8 cm, serta luas permukaan *plunger* 0,0041 m². Jumlah lilitan yang dipakai untuk grafik dibawah yaitu 1500 hingga 5500.

Gambar 15 adalah grafik hubungan *stroke* terhadap fluks magnet dengan besar arus 2 ampere serta luas permukaan *plunger* 0,0041 m².



Gambar 15. Grafik Variasi Stroke terhadap Fluks Magnet

Gambar 16 adalah grafik yang dihasilkan antara hubungan arus dan fluks magnet dengan panjang *stroke* 8 cm, serta luas permukaan *plunger* 0,0041 m².



Gambar 16. Grafik Arus Listrik terhadap Magnet

Luas Permukaan Daerah Lilitan Kawat

$$A = \pi d_1 \times t \quad (11)$$

A = Luas permukaan lilitan kawat [m²]

d_1 = Diameter luar kumparan [m]

t = panjang total kumparan [m]

Perhitungan:

- Kondisi Dua Kumparan :

$$A = \pi(0,015) \times (92 \times 10^{-3})$$

$$A = 0,00434 \text{ m}^2$$

Luas permukaan daerah lilitan kawat dua kumparan dengan panjang 92 mm menggunakan persamaan (11) sebesar 0,00434 m².

- Kondisi Satu kumparan :
 $A = \pi(0,015) \times (46 \times 10^{-3})$
 $A = 0,00217 \text{ m}^2$

Luas permukaan daerah lilitan kawat satu kumparan dengan panjang 46 mm menggunakan persamaan (11) sebesar 0,00217 m².

Kuat Medan Magnet Solenoid

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (12)$$

ϕ = Fluks magnet [Wb]
 A = Luas permukaan daerah lilitan kawat [m²]

- Kondisi Dua Kumparan

$$B = \frac{0,000458}{0,00434}$$

$$B = 0,1056 \text{ T}$$

Kuat medan magnet *solenoid* dua kumparan menggunakan persamaan (12) sebesar 0,1056 T.

- Kondisi Satu Kumparan

$$B = \frac{0,000321}{0,00217}$$

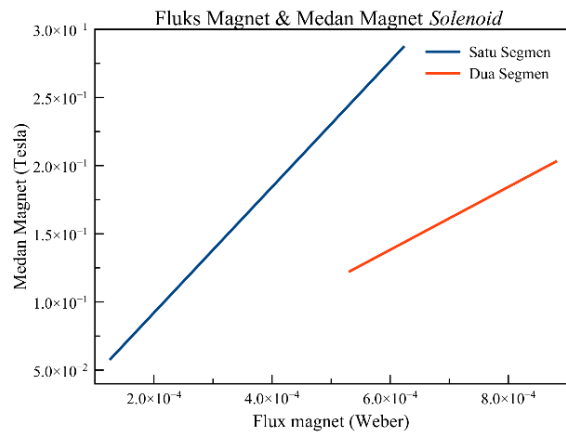
$$B = 0,1456 \text{ T}$$

Kuat medan magnet *solenoid* satu kumparan menggunakan persamaan (12) sebesar 0,1456 T. Grafik fluks magnet terhadap medan magnet ditunjukkan pada Gambar 17.

Gambar 18 dan Gambar 19 secara berurutan menunjukkan ilustrasi medan magnet yang dihasilkan *solenoid* penendang bola dalam kondisi dua serta satu kumparan. Ilustrasi *solenoid* penendang bola menggunakan perangkat lunak *Finite Element Method Magnetics*.

Solenoid penendang bola (dua kumparan) pada ruang bebas menggunakan perangkat lunak *finite element method magnetic*.

Solenoid penendang bola (satu kumparan) pada ruang bebas menggunakan perangkat lunak *finite element method magnetic*.

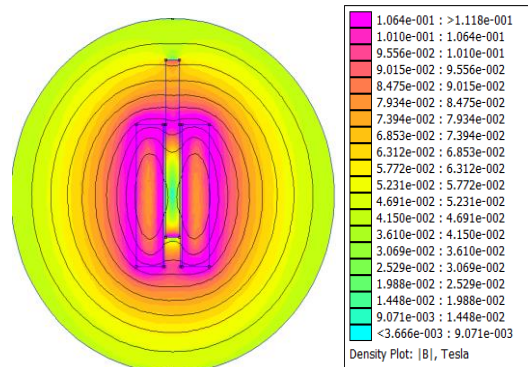


Gambar 17. Grafik fluks magnet terhadap medan magnet *solenoid*

Besar Hambatan Kawat

$$R = \frac{\rho_w l_w}{a_w} \quad (13)$$

R = hambatan kumparan [Ω]
 ρ_w = hambatan jenis kawat [$\Omega.m$]
 l_w = panjang kawat kumparan [m]
 a_w = L.Perm kawat kumparan [m²]



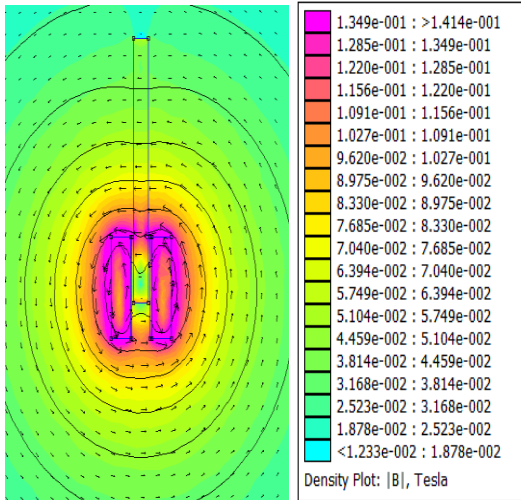
Gambar 18. Hasil simulasi *solenoid* dua kumparan dengan *FEMM*

- Kondisi Dua Kumparan :

$$R = \frac{(1,68 \times 10^{-8})(381,84)}{\pi \times \frac{(0,5 \times 10^{-3})^2}{4}}$$

$$R = 32,66 \Omega$$

Besar hambatan yang dihasilkan kawat tembaga sepanjang 381,84 m menggunakan persamaan (13) yaitu sebesar 32,66 ohm.



Gambar 19. Hasil simulasi solenoid satu kumparan dengan FEMM

- Kondisi Satu Kumparan :

$$R = \frac{(1,68 \times 10^{-8})(264,91)}{\pi \times \frac{(0,5 \times 10^{-3})^2}{4}}$$

$$R = 22,66 \Omega$$

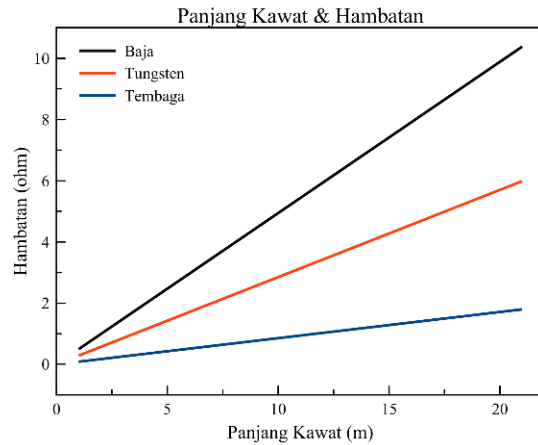
Besar hambatan yang dihasilkan kawat tembaga sepanjang 264,91 m menggunakan persamaan (13) yaitu sebesar 22,66 ohm.

Tabel 3. Hambatan Jenis Kawat

| Material | Hambatan Jenis ($\Omega \cdot m$) |
|----------|-------------------------------------|
| Baja | $9,71 \times 10^{-8}$ |
| Tungsten | $5,6 \times 10^{-8}$ |
| Tembaga | $1,68 \times 10^{-8}$ |

Hambatan jenis dari baja, tungsten, dan tembaga dapat dilihat pada Tabel 3 [6]. Kawat tembaga dipilih sebagai medium aliran arus listrik karena memiliki hambatan jenis paling kecil diantara dua material untuk kawat. Grafik hubungan panjang kawat dengan besar hambatan berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan (13) dapat dilihat pada Gambar 20.

Grafik hubungan panjang kawat dan hambatan menjelaskan tembaga dipilih sebagai material dasar kawat, dengan ukuran sama, besar hambatan paling kecil diantara dua lainnya yaitu tungsten dan baja.



Gambar 20. Grafik panjang kawat terhadap hambatan

Besar Tegangan

$$V = I \times R \quad (14)$$

- V = besar tegangan [V]
- I = besar arus [Ampere]
- R = besar hambatan [ohm]

Besar arus yang mengalir dalam solenoid ditetapkan sebesar 2 ampere.

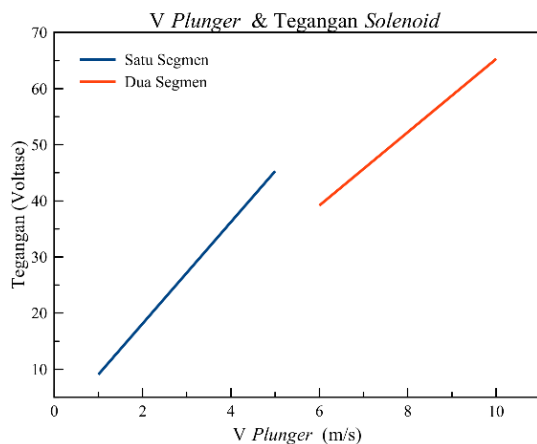
Perhitungan :

- Kondisi Dua Kumparan :
 $V = 2 \times 32,66$
 $V = 65,31 \text{ volt}$

Besar tegangan yang dibutuhkan untuk menghasilkan kecepatan *plunger* 10 m/s dengan kawat berdiameter sepanjang 381,84 m serta hambatan 22,66 ohm menggunakan persamaan (14) adalah 45,31 volt

- Kondisi Satu Kumparan :
 $V = 2 \times 22,66$
 $V = 45,31 \text{ volt}$

Besar tegangan yang dibutuhkan untuk menghasilkan kecepatan *plunger* 5 m/s dengan kawat kumparan berdiameter sepanjang 264,91 m serta hambatan 22,66 ohm menggunakan persamaan (14) adalah 45,31 volt. Grafik hubungan kecepatan *plunger* terhadap tegangan ditunjukkan pada Gambar 21.



Gambar 21. Grafik kecepatan plunger terhadap tegangan

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian yang dilakukan dengan menghubungkan hasil perhitungan akhir menggunakan persamaan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode perhitungan yang dipakai sesuai dengan hasil simulasi menggunakan *software Finite Element Method Magnetics*, karena perbedaan hasil akhir relatif rendah.
2. Semakin panjang *stroke* membutuhkan jumlah kumparan lebih banyak.
3. Kawat bermaterial dasar tembaga murni adalah material yang baik untuk menghantarkan listrik, karena memiliki hambatan jenis paling kecil.
4. Nilai konstanta permeabilitas relatif semakin kecil suatu material menunjukkan kemampuan atau kekuatan magnet akan lebih besar.
5. Tegangan masuk menentukan besarnya arus yang mengalir dalam kumparan listrik.
6. Semakin besar arus listrik dialirkan dalam kumparan, semakin cepat kecepatan *plunger*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Jonathan Christy, Andrew Zebua, Adi Robertus, Erwin Tjoe, Michael Grady, Charisma Bathara, dan Yosua Kurniawan yang telah membantu dalam beberapa tahapan untuk menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ostrowska, K., et al., *Application of Industrial Robot as a Measuring System*. Springer, 2017.
- [2] Karagebovic, I., et al., *Industrial Robot Applications in Manufacturing Processes in Asia and Australia*. Technical Gazette, 2013. 20: p. 365-370.
- [3] Gerndt, R., et al. *Humanoid Robots in Soccer – Robots Versus Humans in RoboCup 2050*. IEE-RAS Robotics & Automation Magazine, 2015. 22: p 147-154.
- [4] Kitano, H. and M. Asada, *The Robocup Humanoid Challenge as The Millennium Challenge for Advanced Robotics*. Advanced Robotics, 2000. **13**(8): p. 723–737.
- [5] Yao, W., et al., *A Simulation System Based on ROS and Gazebo for RoboCup Middle Size League*. IEEE Conference on Robotics and Biomimetics, 2016.
- [6] Craft, C., et al., *Kicking Mechanism for the Pioneer 3-DX*. Capstone Senior Design Project Report, 2008.
- [7] Liu, Y. And J. Zhao, *A Kicking Mechanism for an Autonomous Mobile Robot*. ASEE IL/IN Section Conference, 2008.
- [8] Ribeiro, F., et al., *Magnetically Impelled Kicker for Robotic Football in MSL RoboCup*. Robotico, 2016. **102**: p. 4-7.
- [9] van Goch, B.P.T., *Optimizing a Solenoid For a Robocup Kicker*. Technische Universiteit Eindhoven, 2006.
- [10] Tilburgs, R., *Design and Realization Of a Solenoid for a Robocup Kicking Device*, Technische Universiteit Eindhoven, 2006.
- [11] Chikushi, S., et al., *Overview of Hibikino-Musashi Hardware and Software*. RoboCup, 2016.
- [12] S.H. Kasaei, et al., *Design and Implementation Solenoid Based Kicking Mechanism for Soccer Robot Applied in Robocup-MSL*, International Journal of Advanced

- Robotic Systems, 2010. 7(4): p. 73 - 80.
- [13] Li, C., et al., *The Real-time and Embedded Soccer Robot Control System*, Robot Soccer, 2010.
- [14] Faria, B.M., et al., *Machine Learning Algorithms Applied to the Classification*, IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems of Robotic Soccer Formations and Opponent Teams, 2010.
- [15] Praveen, K. B. ,*Design of Magnetic Actuator*. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2015. 4(10): p. 370-374.
- [16] Pahl, G., et al., *Engineering Design 3rd Edition: A Systematic Approach*. University of Berlin, 2007.