

BAB III

PELAKSANAAN PROYEK

3.1 Kedudukan

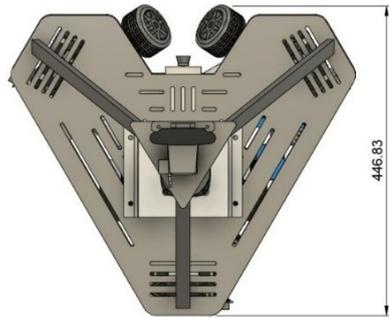
Pada project MBKM independen ini penulis bertugas dan bertanggungjawab dalam divisi design dan mechanical dimana penulis memiliki jobdesc untuk mendesain robot tersebut beserta perhitungannya. Penulis memiliki jobdesc untuk mendesain mekanisme penggiring dan penendang bola beserta inverse kinamtic.

Struktur kedudukan dalam pelaksanaan proyek independen ini melibatkan dua pembimbing utama:

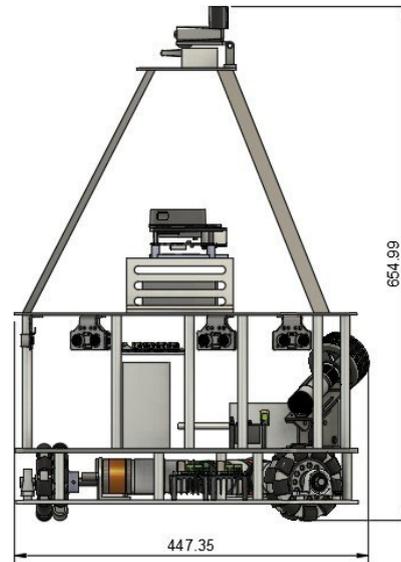
- *Advisor* (Pembimbing Laporan) yang bertugas memberikan arahan dan supervisi terhadap penyusunan laporan akhir proyek, termasuk tinjauan akademik dan sistematika laporan.
- *Supervisor* (Pembimbing Teknis) yang bertanggung jawab terhadap aspek teknis proyek di lapangan, termasuk memberikan bimbingan terhadap perancangan mekanik, pengujian sistem dan validasi model pergerakan robot.

3.2 Desain Robot

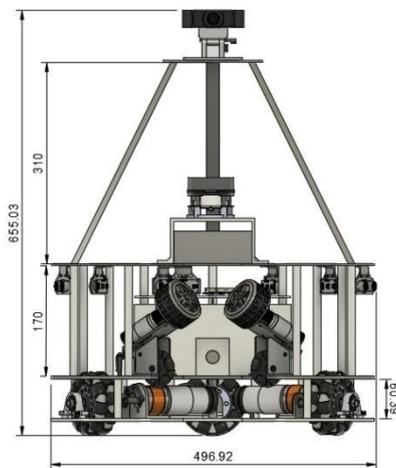
Robot didesain menggunakan aplikasi fusion 360. Robot yang didesain bernama Bison adalah sebuah robot sepak bola beroda yang memiliki misi untuk mencari, menangkap, menggiring bola, serta mencetak gol ke gawang lawan. Bison memiliki 3 tingkat yaitu *base 1*, *base 2*, dan *base 3*.



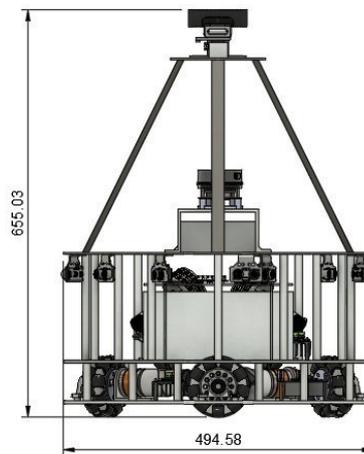
(a) tampak depan robot



(c) tampak samping robot

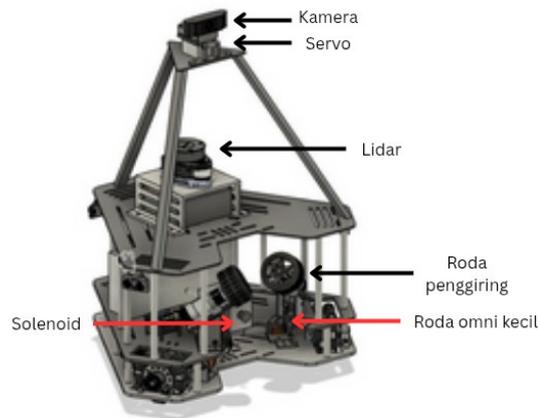


(b) Tampak atas robot



(d) tampak belakang robot

Gambar 1 - dimensi robot secara keseluruhan (dalam mm)



Gambar 2 – 3D robot

Bison berbentuk segitiga dengan mulut ditengahnya untuk memungkinkan penangkapan bola. Gambar 1 menjelaskan bahwa Bison memiliki dimensi 49,45 cm x 43,32 cm x 65,50 cm. Gambar 2 adalah gambar 3D robor Bison beserta komponen vitalnya. Pada *base 1* terdapat beberapa komponen yaitu roda *omnidirectional wheel*, motor DC, dan motor driver. Pada *base 2* ditempatkan baterai *lithium ion*, solenoid sebagai penendang, dua buah motor DC, ban RC yang berfungsi menangkap dan menggiring bola, roda omni kecil yang berperan agar bola tetap berputar ke segala arah ketika digiring. Pada *base 3* termuat beberapa komponen lain yaitu mini PC sebagai otak robot, lidar untuk melakukan *mapping*, *emergency push putton* dan step down. Pada tingkatan paling atas terdapat kamera untuk mencari robot, dan servo yang berfungsi menggerakan kamera naik turun.

Pada *base 2* yang tebalnya 5 mm, terdapat beberapa komponen yaitu baterai, PCB, Motor PG28, driver motor, roda RC, *Shockbreaker* RC dan roda *omniwheel* kecil berbahan plastik. *Base 2* ini diperuntukkan untuk mendukung misi robot yaitu menggiring menggunakan roda yang perputarannya masuk kedalam agar bola dapat di grip oleh roda. *Shockbreaker* roda digunakan agar roda bisa fleksibel dalam menangkap dan menggiring bola. Berikut adalah gambar implementasinya.

Base 2 juga diperuntukkan untuk menempatkan mekanisme penendang

menggunakan solenoid *push pull* dengan kekuatan sebesar 80N dan panjang *plunger* 15 cm. Plat *base 2* dibuat menggunakan alumunium menggunakan jasa laser cutting. Pada *base 2* terdapat beberapa lubang yang berfungsi sebagai sirkulasi udara, tiang pondasi, dan dudukan motor PG28.

3.3 Pemilihan Material dan Komponen Penggerak

- Roda *omniwheel* kecil diameter 50,5 mm

Roda ini memungkinkan gerakan lateral (*samping*) karena memiliki roller-roller kecil di sekelilingnya. Digunakan untuk mendukung perputaran bola saat di grip oleh roda RC dan meminimalisir gaya gesek yang terjadi antara ban RC dengan bola.



Gambar 3 – Roda Omni kecil

Roda omniwheel seperti pada gambar 3 juga dilengkapi dengan dudukan yang berfungsi memposisikan roda omniwheel kecil dibawah motor PG28. Desain dudukan omniwheel dibuat miring keatas sebagai penyangga motor PG28 agar posisi roda RC bisa di adjust naik turun ketika bola masuk dan keluar dari sistem penggiring. Berikut adalah desain dudukan omniwheel kecil



Gambar 4 – dudukan penangkap motor PG28

- Roda RC

Gambar 4 adalah roda RC yang memiliki fungsi utama untuk menggiring bola. Desainnya memungkinkan bola masuk ke antara dua roda yang berputar ke arah dalam, sehingga menciptakan efek menjepit atau “*grip*” untuk mengontrol bola.



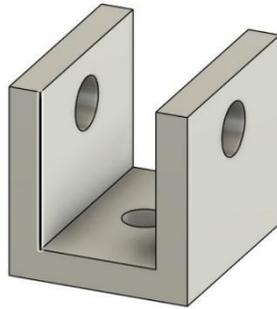
Gambar 5 – Roda RC penggiring

- Shock Breaker RC



Gambar 6 – Shockbreaker RC

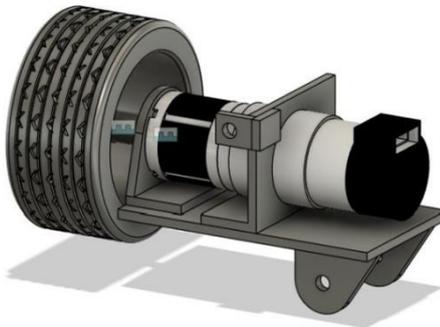
Gambar 6 menunjukkan shockbreaker RC. Komponen ini memberikan fleksibilitas vertikal pada roda RC, sehingga roda dapat menyesuaikan ketinggiannya secara otomatis saat bertemu bola. Ini penting untuk menjaga kontak optimal antara roda dan bola meskipun terdapat variasi permukaan atau tekanan. Shockbreaker ini juga dilengkapi dudukan seperti pada gambar 7. Dudukan ini berbahan aluminium setebal 3mm.



Gambar 7 – Dudukan shockbreaker

- Dudukan Motor PG28

Gambar 8 menunjukkan gambar dudukan ini berfungsi sebagai tempat yang stabil dan kokoh untuk memasang motor PG28 ke *base 2*. Dirancang dengan akurasi tinggi menggunakan *laser cutting* agar posisi motor sejajar dan kuat.



Gambar 8 – Dudukan motor PG28

- Motor PG28



Gambar 9 – Motor PG28

Gambar 9 menunjukkan motor yang digunakan untuk menggerakkan roda RC. Dikenal dengan torsi yang cukup besar dan ukuran yang kompak, PG28 cocok untuk aplikasi seperti ini karena mampu memutar roda dengan kecepatan dan kekuatan yang cukup untuk menggiring bola.

- Solenoid push pull 80N



Gambar 10 – Solenoid

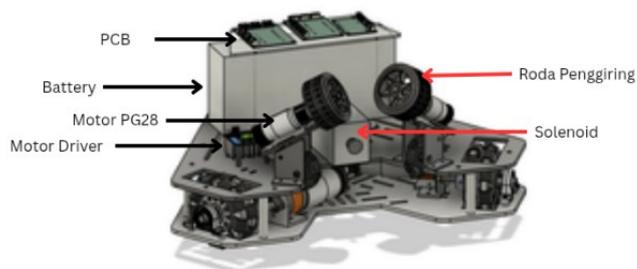
Sistem penendang pada robot ini menggunakan aktuator berupa solenoid linear JF-1683B seperti pada gambar 10. Solenoid ini bekerja pada tegangan 12V dan memiliki ukuran $52 \times 58 \times 83$ mm. Aktuator ini mampu menghasilkan gaya dorong sebesar 80 Newton dengan panjang gerak (*stroke plunger*) sekitar 20 mm, yang digunakan untuk memberikan impuls tendangan ke bola. *Plunger* atau batang penarik pada solenoid dimodifikasi dengan menambahkan panjang sekitar 3 cm guna memaksimalkan kontak dengan bola saat proses penendangan. Pemilihan solenoid ini didasarkan pada keunggulannya yang responsif, sederhana dalam pemasangan, dan cocok digunakan pada sistem penendang berbasis gaya dorong linear. Kemudian pada ujung *plunger* yang menyentuh langsung dengan bola ditambahkan semacam corong dengan ukuran yang lebih lebar agar *surface area* yang melakukan kontak fisik dengan bola lebih banyak dan lebih efisien dalam mentransfer energi.

Sebagai tambahan ada beberapa *bracket simple* yang digunakan untuk komponen seperti baterai, PCB, mini PC, lidar, dan kamera. Untuk

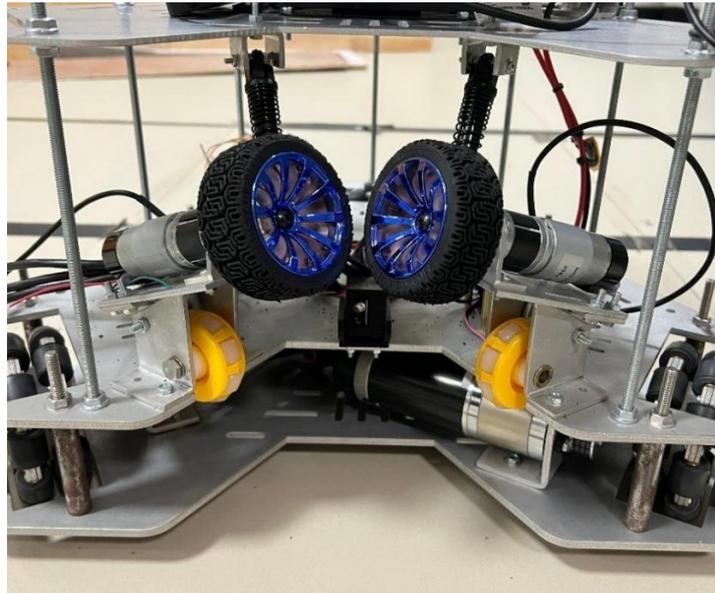
batre digunakan *bracket* siku berbahan besi dengan jumlah lima siku. *Bracket* batrai ditempatkan pada keempat sisi batrai untuk menjaga batrai agar tidak bergerak, setelah itu PCB ditempatkan diatas batrai dengan menggunakan akrilik setebal 3 mm sebagai alas dan 3 *spacer* dengan masing masing panjangnya 4 cm maka didapatkan tinggi akrilik alas PCB ke *base* 2 sepanjang 12 cm. Pada space antara batre dan akrilik alas PCB ditambahkan *roswoll* yang berfungsi menjaga hawa panas dari batrai yang ditakutkan akan menyebar ke PCB.

3.3.1 Mekanisme Penggiring

Sistem penggerak didukung oleh dua buah ban RC berbahan karet dengan diameter ban 6 mm yang diletakkan terangkat berbentuk segitiga terbuka pada sisi kanan dan kiri. Pada sisi *bracket* kedua ban ini ditambahkan *shockbreaker* RC yang berfungsi sebagai per agar sistem penggiring ini bisa fleksibel naik dan turun ketika bola terisi dan kosong. Sistem penggerak ini di dukung oleh roda omni kecil berdiameter 10 mm yang diletakkan dibawah *bracket* ban berfungsi agar bola dapat bergerak bebas ketika digiring dan meminimalisir gaya gesek yang terjadi antara bola dan ban. Penempatan komponen tersebut dapat dilihat pada gambar 11 dan implementasinya pada gambar 12.

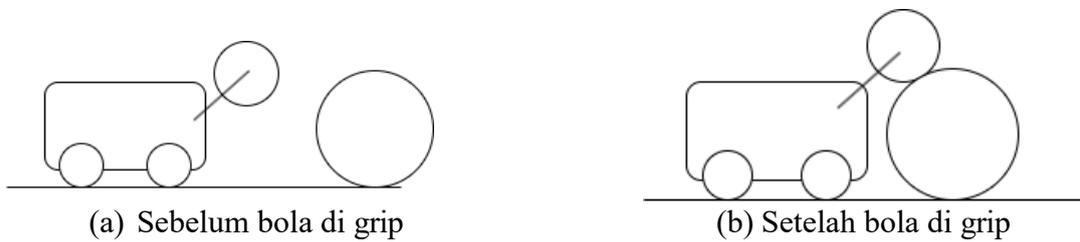


Gambar 11 – komponen base 2

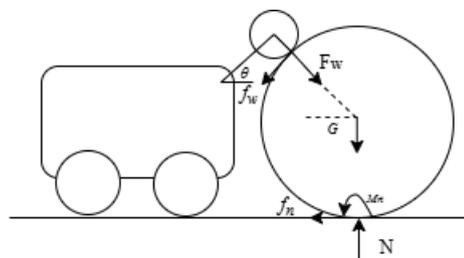


Gambar 12 – Implementasi mekanisme penggiring

Bola sepakbola yang dipakai adalah bola dengan standar FIFA berukuran 4 dengan beratnya adalah 400gr dan berdiameter 64 cm.



Gambar 13 – Ilustrasi ketika bola sebelum dan sesudah masuk sistem penggiring



Gambar 14 – Body Diagram mekanisme penggiring

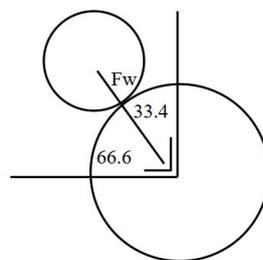
Gambar 13 adalah ilustrasi sistem penggiringan bola pada saat bola sebelum dan sesudah masuk penggiring. Bola tersebut memiliki radius R sebesar 0.032 m, massa m_b yaitu 0.4 kg, dan rotasi inersia J_b . Bola tersebut dipengaruhi F_w dari roda yang menekan bola, gaya normal N dari ground, gravitasi dan momen M_n akibat interaksi di antara objek-objek tersebut..Jika diasumsikan gaya gesek antara karet dengan karet (bola dengan ban penggiring) 1.15 [12] dan karet dengan karpet (bola dengan karpet) adalah 0.6. Seluruh gaya yang bekerja pada bola dapat diuraikan dan dicantumkan sebagai berikut (percepatan dan percepatan angular masing-masing dapat dinyatakan dengan a_x dan ϵ_b) [13]. Gaya gaya yang mempengaruhi bola tersebut terdapat pada gambar 14. Persamaan gerak vertikal dapat dinyatakan dalam rumus pada persamaan 1.

$$\Sigma F_x = F_w \cos \theta - f_w \sin \theta - f_n + M_n R = m_b a_x \quad (1)$$

Pada beberapa kasus, persamaan ΣF_x dapat diabaikan apabila fokus analisis hanya tertuju pada kestabilan penjepitan bola secara vertikal, seperti memastikan bola tidak jatuh atau cukup terjepit oleh roda penjepit. Dalam hal ini, persamaan ΣF_y yang mencakup gaya berat, gaya normal, dan komponen vertikal dari gaya roda dan gaya gesek sudah dianggap cukup untuk menentukan kondisi keseimbangan sistem. G atau gaya gravitasi dihitung pada persamaan 2 dan 3.

$$G = m * g \quad (2)$$

$$G = 3.924 \quad (3)$$



Gambar 15 – Sudut sudut antara bola dan roda penggiring

Lingkaran besar merepresentasikan bola futsal, sementara lingkaran kecil di atasnya adalah roda penggiring yang menekan bola dengan arah miring. Gaya kontak yang dihasilkan roda ke permukaan bola dilambangkan sebagai F_w , yang bekerja dengan sudut sebesar 66.6° seperti pada gambar 15. Pada gaya vertikal ini bola dipengaruhi oleh F_w gaya dari roda dengan massa roda adalah 50 gram, selain itu bola juga dipengaruhi oleh f_w yaitu gaya gesek yang terjadi antara bola dengan roda dengan nilai koefisien gesek adalah 1.15, maka persamaan yang dapat digunakan tercantum pada persamaan 4.

$$\Sigma F_y = N - G - F_w \sin \theta + f_w \cos \theta \quad (4)$$

Karena keterbatasan alat pengukuran yang bisa digunakan untuk menghitung tekanan dari roda untuk bola yaitu F_w maka digunakan persamaan 5.

$$F_w \sin \theta = m * a \quad (5)$$

Dengan asumsi bahwa a adalah 9.8 mengikuti percepatan bumi karena vertikal bergerak atas dan bawah. Gaya yang mempengaruhi agar sama dengan 0 dihitung pada persamaan 6 sampai 18.

$$F_w \sin \theta = 0.05 * (9.8)$$

$$F_w = \frac{0.05 * 9.8}{\sin 66.6} \quad (6)$$

$$F_w = 0.536 \quad (7)$$

$$f_w \cos \theta = 4.5126 * \cos (32.4) \quad (8)$$

$$f_w \cos \theta = 3.924 * 0.919 \quad (9)$$

$$f_w \cos \theta = 1.091 \text{ N} \quad (10)$$

$$N = G + F_w \sin \theta - f_w \cos \theta \quad (11)$$

$$N = 3.924 + 0.284 \text{ N} - 3.808 \text{ N} \quad (12)$$

$$N = 0.4 \text{ N} \quad (13)$$

Gaya total keatas

$$G + F_w \sin \theta = 3.924 + 0.284 \quad (14)$$

$$G + F_w \sin \theta = 4.208 \text{ N} \quad (15)$$

Gaya total kebawah

$$N + f_w \cos \theta = 0.4 + 38.08 \quad (16)$$

$$N + f_w \cos \theta = 4.208 \text{ N} \quad (17)$$

$$\text{Gaya keatas} = \text{gaya kebawah} = 4.208 = \Sigma F_y = 0 \quad (18)$$

$$\Sigma M = f_w R - f_n R = J_b \epsilon_b \quad (19)$$

Momen inersia dengan bola pejal memiliki rumus pada persamaan 20. Selanjutnya pada persamaan 21 hingga 26 merupakan perhitungan untuk mendapatkan percepatan angular.

$$J_b = \frac{2}{3} mR^2 \quad (20)$$

$$J_b = \frac{2}{5} * 0.4 * 0.32^2 \quad (21)$$

$$J_b = 0.0273 \text{ N} \quad (22)$$

$$\epsilon_b = \frac{f_w R - f_n R}{J_b} \quad (23)$$

$$f_w R - f_n R = 0.690 \quad (24)$$

$$\epsilon_b = \frac{0.690}{0.0273} \quad (25)$$

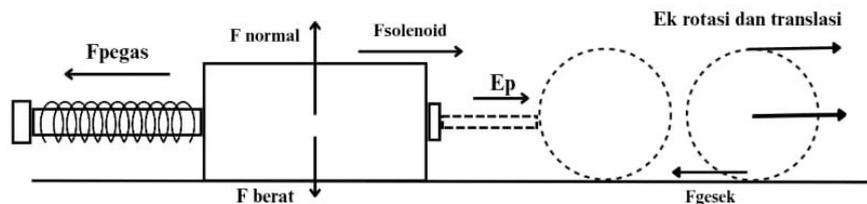
$$\epsilon_b = 25.30 \text{ rad/s}^2 \quad (26)$$

Dapat dihitung torsi motor yang diperlukan untuk menggerakkan sistem penggiring pada posisi roda berada pada atas bola dan keadaan roda sudah menyala sebelum bola masuk ke sistem penggiring dengan persamaan 27 hingga 33.

Berhasil	Berhasil	Berhasil	Berhasil
Berhasil	Berhasil	Berhasil	Berhasil
Berhasil	Berhasil	Berhasil	Berhasil
Berhasil	Berhasil	Berhasil	Berhasil
Berhasil	Berhasil	Berhasil	Berhasil

Berdasarkan Tabel 1 yang berisi data pengujian mekanisme penggiring, diketahui bahwa sistem telah diuji sebanyak 30 kali untuk masing-masing arah gerak, yaitu depan, belakang, kanan, dan kiri. Seluruh hasil pengujian menunjukkan status "Berhasil", yang berarti mekanisme penggiring mampu mempertahankan bola tetap berada di depan penggiring selama pergerakan ke semua arah tanpa mengalami kegagalan.

3.3.2 Mekanisme Penendang



Gambar 16 – Body diagram solenoid

Pada mekanisme penendang, digunakan aktuator solenoid 80N dengan voltase 12 V dan kebutuhan arus adalah 10 A. Ketika robot akan melakukan tendangan pada bola, maka kumparan harus dialiri listrik dengan tegangan dan waktu tertentu sehingga solenoid bisa menarik besi yang dimanfaatkan untuk dorongan pada tendangan. Ketika proses menendang bola sudah selesai, aliran listrik pada tembaga bisa dimatikan sehingga posisi besi kembali seperti semula. Pada saat proses penarikan besi oleh solenoid, terjadi gaya dorongan yang sangat kuat, dorongan ini bisa membuat sesuatu yang ditabraknya bisa terlempar jauh[14].

Gaya gaya dan energi yang mempengaruhi bola pada saat ditendang tersebut dijabarkan pada gambar 16.

Komponen utama sistem ini terdiri dari *plunger*, kumparan (*coil*), dan pegas. *Plunger* adalah batang logam feromagnetik yang dapat bergerak maju mundur di dalam rumah solenoid. Ketika arus listrik dialirkan ke kumparan, akan terbentuk medan magnet yang menarik *plunger* ke dalam tubuh solenoid, menghasilkan gaya F_{solenoid} . Saat *plunger* tertarik, pegas yang terletak di sisi belakang akan terkompresi dan menyimpan energi elastis. Ketika arus listrik dihentikan, tidak ada lagi gaya elektromagnetik, sehingga pegas mendorong *plunger* kembali ke posisi semula dengan gaya F_{pegas} . *Stroke* adalah jarak maksimum yang bisa ditempuh oleh *plunger* (batang logam) saat bergerak maju atau mundur di dalam solenoid. Solenoid ini kemudian dimodifikasi yang sebelumnya panjang *strokenya* 20 mm ditambahkan dengan bahan yang sama menjadi 50 mm.

Pada sistem ini diasumsikan bahwa jenis pegas yang digunakan adalah pegas linear dan waktu pada saat *plunger* dari posisi *idle* mencapai *stroke* maksimal adalah 0.15s dengan menggunakan pengujian osiloskop. Dengan menggunakan hukum kekekalan energi, maka bisa menghitung perbandingan energi dari solenoid dan aktual yang terdorong pada bola dengan memakai rumus utama yaitu energi kinetik seperti pada persamaan 34 kemudian dapat dicari kecepatan awal atau v_0 dengan rumus GLBB dari persamaan 35 hingga 46.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (34)$$

$$\Delta x = v - \frac{1}{2} at^2 \quad (35)$$

$$\Delta x = 0 - \frac{1}{2} at^2 \quad (36)$$

$$2(\Delta x) = -1 at^2 \quad (37)$$

$$a = -\frac{2\Delta x}{t^2} \quad (38)$$

$$a = -\frac{2(3.31)}{7.989^2} \quad (39)$$

$$a = -\frac{6.62}{63.824} \quad (40)$$

$$a = -0.1037225 \text{ m/s}^2 \quad (41)$$

$$\Delta x = v_0 + \frac{1}{2}at^2 \quad (42)$$

$$v_0 = \Delta x - \frac{1}{2}at^2 \quad (43)$$

$$v_0 = 3.31 - \frac{1}{2}(-0.1037225)(7.989)^2 \quad (44)$$

$$v_0 = 3.31 + 3.31 \quad (45)$$

$$v_0 = 6.62 \text{ m/s} \quad (46)$$

$$E_k = \frac{1}{2}(0.4)(6.62)^2 \quad (47)$$

$$E_k = 8.7648 \text{ J} \quad (48)$$

Momen Inersia Roda Berongga

$$I = \frac{2}{5} mR^2 \quad (49)$$

$$I = \frac{2}{5}(0.4)(0.32)^2 \quad (50)$$

$$I = 0.0271 \text{ J} \quad (51)$$

Total energi Kinetik bola

$$E_k = E_k + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (52)$$

$$E_k = 8.16488 + \frac{1}{2}(0.02731)\frac{V^2}{R} \quad (53)$$

$$E_k = 8.16488 + \frac{1}{2}(0.02731)\frac{6.62^2}{0.32} \quad (54)$$

$$E_k = 8.16488 + 5.844 \quad (55)$$

$$E_k = 14.60888 \text{ J} \quad (56)$$

$$E_p = \frac{1}{2} * k * x^2 \quad (57)$$

$$E_p = \frac{1}{2}(1176)(0.055^2) \quad (58)$$

$$E_p = 1.7787 \text{ J} \quad (59)$$

$$E_{solenoid} = V * I * t \quad (60)$$

$$E_{solenoid} = 12 * 10 * 0.15 \quad (61)$$

$$E_{solenoid} = 18 \text{ J} \quad (62)$$

Dengan asumsi bahwa pegas yang dipakai linear maka dapat dicari gaya

pegas dan konstanta pegasnya pada persamaan 63 dan 64.

$$F_{pegas} = k * x \quad (63)$$

$$k_{pegas} = \frac{m * g}{\Delta x} \quad (64)$$

Dengan melakukan percobaan, didapatkan ketika pegas diberikan benda bermassa 3 kg maka pegas akan mengerut dan panjangnya adalah 3 cm, ketika pegas tidak diberi beban apapun panjang pegasnya adalah 5.55 cm. Maka didapatkan persamaan seperti pada persamaan 65 hingga 69.

$$k_{pegas} = \frac{3 * 9.8}{0.025} \quad (65)$$

$$k_{pegas} = \frac{29.4}{0.025} \quad (66)$$

$$k_{pegas} = 1176 \quad (67)$$

$$F_{maxpegas} = 1176 * 0.055 \quad (68)$$

$$F_{maxpegas} = 64.68 \text{ N} \quad (69)$$

Tabel 2 – Data Pengujian Sistem Penendang

No	Jarak (m)	Waktu (s)
1	3.43	8.55
2	2.77	6.35
3	3.23	7.75
4	3.40	8.21
5	3.35	7.55
6	3.46	8.73
7	3.40	0.857
8	2.78	7.3
9	3.72	8.11
10	3.02	0.822
11	3.56	8.49
12	3.62	8.52
13	3.24	7.89
14	3.36	7.64
15	3.30	7.96
16	3.25	7.83
17	3.36	8.11

18	2.91	6.92
19	3.49	8.47
20	3.10	7.35
21	3.60	8.64
22	2.98	7.01
23	3.42	8.33
24	3.27	7.89
25	3.15	7.48
26	3.01	7.12
27	3.55	8.38
28	2.88	6.74
29	3.40	8.26
30	3.19	7.62
Rata-rata	3.27	7.36

Analisis perbandingan antara perhitungan teoritis dan hasil percobaan mekanisme penendang solenoid menunjukkan bahwa meskipun terdapat beberapa ketidaksesuaian, sistem ini secara fungsional berhasil. Perhitungan teoritis menunjukkan energi kinetik yang diberikan pada bola (14.60888 J) lebih kecil dari energi yang dihasilkan solenoid (18 J), selisih nilai tersebut dapat dikatakan sebagai inefisiensi. Inefisiensi dapat disebabkan oleh berbagai faktor, di antaranya adalah kehilangan energi akibat gesekan antara *plunger* dengan dinding tabung solenoid, serta gesekan antara bola dengan permukaan lintasan. Selain itu, sebagian energi listrik yang masuk ke solenoid juga hilang dalam bentuk panas akibat resistansi kumparan, serta adanya benturan tidak elastis saat bola terdorong yang menyebabkan energi hilang dalam bentuk suara dan deformasi. Faktor lain yang turut menyumbang inefisiensi adalah distribusi gaya dorong yang tidak optimal akibat ketidaksesuaian posisi *plunger* dengan medan magnet maksimum saat impuls diberikan. Lebih lanjut, modifikasi panjang *plunger* yang dilakukan menunjukkan indikasi bahwa *plunger* tidak bergerak secara lurus 100%, sehingga menimbulkan gesekan tambahan dan kehilangan arah gaya dorong selain itu, inefisiensi juga dapat diperburuk oleh pemilihan pegas dengan *spring rate* yang terlalu tinggi, sehingga menghasilkan gaya dorong yang besar namun sulit untuk dikompresi. Pegas dengan *spring rate* tinggi membutuhkan energi lebih besar untuk ditarik terutama jika sistem pelepasan tidak sepenuhnya presisi. Ketidaksejajaran ini tidak hanya mengurangi efisiensi transfer energi, tetapi juga berpotensi

menurunkan akurasi arah tendangan bola Selain itu, perhitungan pegas diasumsikan linier, padahal pegas yang digunakan bersifat non- linier. Penting juga untuk dicatat bahwa asumsi gaya gesek antara bola dan karpet adalah 0.6, dan gaya gesek yang dominan dapat menyebabkan percepatan horizontal negatif pada bola. Meskipun demikian, hasil percobaan menunjukkan bahwa mekanisme penendang mampu mencapai dan bahkan melampaui target desain yang telah ditentukan, yaitu menendang bola hingga jarak 3 meter, dengan rata-rata jarak tendangan tercatat 3.27 meter.

Tabel 3 – Data Pengujian Energi Solenoid

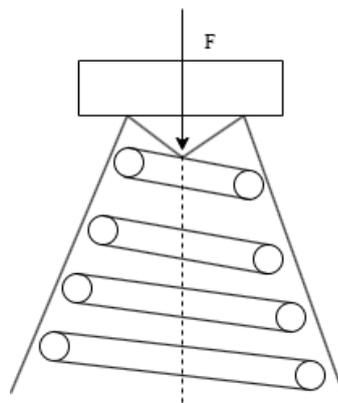
No	Jarak (cm)	Berat (kg)
1	2	3.4466
2	2	3.6613
3	2	3.3240
4	2	3.8573
5	2	3.3732
6	2	3.5100
7	2	3.7250
8	2	4.0003
9	2	3.9500
10	2	3.5800
11	2	3.2900
12	2	3.7200
13	2	3.9997
14	2	2.732
15	2	3.6100

Berdasarkan hasil eksperimen dengan solenoid 80 N yang menghantam *load cell*, diperoleh data pembacaan sebesar 2.732 kg hingga 4.0003 kg, dengan rata-rata sekitar 3.5853 kg. Jika dikonversi ke gaya menggunakan percepatan gravitasi (9.81 m/s^2), maka gaya rata-rata yang terukur adalah sekitar 34.11 N, dan gaya maksimum sekitar 39.24 N. Ini menunjukkan bahwa hanya sekitar 42–49% dari total gaya nominal solenoid yang benar-benar terukur oleh *load cell*.

Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh beberapa faktor. Pertama, durasi kontak antara solenoid dan *load cell* sangat singkat, sehingga *load cell* hanya sempat membaca sebagian dari impuls gaya total. *Load cell* umumnya merespons secara

lebih akurat terhadap gaya statis atau semi-statis, bukan impuls pendek seperti hantaman. Kedua, terdapat rugi-rugi mekanik seperti gesekan, getaran, atau ketidaksejajaran arah pukulan, yang mengurangi efisiensi transfer gaya dari solenoid ke sensor. Ketiga, respons *load cell* dan modul ADC HX711 memiliki waktu sampling tertentu, sehingga jika gaya puncak berlangsung lebih cepat dari waktu sampling, pembacaan puncak bisa terlewat. Selain itu, variasi antar data (dengan selisih hingga 1.3 kg atau setara 12.7 N) juga bisa disebabkan oleh ketidakkonsistenan posisi pukulan atau variasi tegangan suplai yang memengaruhi kekuatan solenoid.

Faktor-faktor tersebut menyebabkan gaya yang dikeluarkan solenoid saat kontak dengan bola menjadi berbeda-beda, sehingga jarak dan waktu tempuh bola setelah ditendang pun menjadi variatif. Selain itu, data terendah sebesar 2.732 kg terjadi saat tatakan *load cell* hampir patah, yang menunjukkan kemungkinan terjadinya deformasi atau peredaman gaya selama kontak, sehingga hasil pembacaan menjadi jauh lebih kecil dari semestinya.



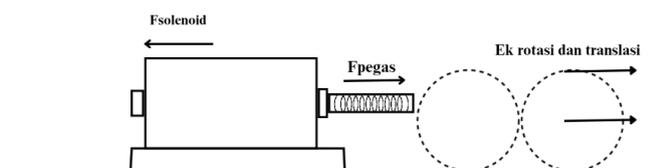
Gambar 17 – Ilustrasi Conical Spring

Pada solenoid yang digunakan pada robot bison adalah pegas non linear dengan tipe *conical spring* atau pegas kerucut yang dapat dilihat ilustrasinya pada gambar 17, yaitu pegas berbentuk kerucut dengan diameter lilitan yang mengecil ke salah satu ujung. Pegas ini tergolong sebagai pegas non-linear, karena hubungan antara gaya yang diberikan dan perubahan panjangnya tidak bersifat linier seperti pada pegas silinder biasa. Karakteristik utama dari conical spring adalah gaya pegasnya akan meningkat secara bertahap—kecil di awal kompresi dan menjadi

lebih besar saat lilitan-lilitan bawah mulai bersentuhan.

Pegas non-linear yang berbentuk kerucut (*conical spring*), memiliki karakteristik gaya yang tidak sebanding secara langsung dengan perubahan panjangnya. Hal ini menyebabkan konstanta pegas k tidak dapat ditentukan hanya dengan menggunakan rumus linear $F = k * x$. Ketika gaya diberikan dari satu titik di bagian atas (titik pusat), distribusi beban tidak menyebar merata ke seluruh lilitan pegas, terutama pada bagian bawah yang lebih lebar. Akibatnya, tidak semua lilitan ikut menahan gaya secara bersamaan, dan hanya sebagian pegas yang aktif tergantung seberapa besar kompresi yang terjadi. Selain itu, saat lilitan-lilitan mulai bersentuhan, panjang efektif pegas berubah, sehingga respons pegas terhadap gaya menjadi semakin kompleks dan non-linier. Kekakuan pegas (*stiffness*) berubah sepanjang proses kompresi, karena hanya sebagian lilitan yang aktif tergantung seberapa dalam pegas dikompresi. Ini menyebabkan konstanta pegas tidak tetap, sehingga tidak bisa diukur secara langsung seperti pada pegas biasa[15].

Pemodelan yang dilakukan dalam proyek ini tidak dapat dikatakan 100% akurat dengan kondisi nyata di lapangan. Hal ini disebabkan oleh beberapa keterbatasan, seperti tidak tersedianya datasheet resmi dari beberapa komponen yang digunakan serta keterbatasan alat ukur yang dimiliki. Akibatnya, beberapa parameter penting harus diestimasi secara manual atau berdasarkan asumsi yang mendekati kondisi sebenarnya. Meskipun pendekatan ini telah diupayakan sebaik mungkin agar tetap merepresentasikan sistem dengan akurat, tetap terdapat kemungkinan deviasi antara hasil simulasi dan performa aktual dari sistem yang dikembangkan.



Gambar 18 - Solenoid system pegas

Sebagai bahan eksperimen selanjutnya untuk menemukan gaya yang paling kuat untuk mendorong bola, sistem solenoid dapat dimodifikasi dengan membalik arah kerjanya dan menambahkan mekanisme pegas sebagai sumber energi utama untuk mendorong bola seperti pada gambar 18. Dalam konfigurasi ini, solenoid digunakan untuk mengompresi dan menahan pegas, sehingga energi potensial yang tersimpan dapat dilepaskan secara efektif untuk menghasilkan dorongan pada bola. Mekanisme ini bekerja seperti sistem pelontar pegas atau pistol mainan, di mana *plunger* ditarik dan dikunci dalam posisi siap tembak dengan komponen seperti servo atau solenoid yang lebih kecil untuk menjadi pengunci. Plunger atau batang di dalamnya akan bergerak masuk dan terkunci oleh sistem pengait (*latch*). Saat ditekan lagi, mekanisme pengait tersebut akan melepaskan kunci, sehingga plunger kembali ke posisi semula. Dengan pendekatan ini, solenoid kecil atau servo akan aktif dalam waktu sangat singkat untuk membuka kunci, sehingga konsumsi dayanya jauh lebih rendah dibandingkan penggunaan solenoid utama secara kontinu. Hal ini membuat sistem lebih hemat energi dan tidak membebani baterai secara signifikan.

Agar gaya dorong yang dihasilkan optimal dan sistem tetap mudah dikendalikan, pegas yang digunakan juga perlu dimodifikasi, khususnya dengan memilih *spring rate* (konstanta pegas) yang lebih rendah dibandingkan pegas yang digunakan saat ini. Pegas dengan *spring rate* lebih rendah akan lebih mudah dikompresi dan memungkinkan pelepasan energi yang lebih terkendali namun tetap cukup kuat untuk mendorong bola dengan jarak yang diinginkan. Selanjutnya solenoid utama juga bisa ditempatkan tidak tepat di tengah bola melainkan diatas bola agar ketika tertembak, bola bisa menggelinding lebih jauh sejak putaran pertama.