

ASSESSMENT OF MOBILE ROBOT LOAD-CARRYING POTENTIAL VIA DC GEARBOX MOTOR TORQUE

Harsa Dhani¹, Nereus Tugur Redationo², William Dhancis³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Katolik Widya Karya Malang

Email: dhani_mesin@widyakarya.ac.id, tugur@widyakarya.ac.id, 201931008@widyakarya.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

Naskah Diterima:
19 Juni 2024

Naskah Disetujui:
26 Juni 2024

Naskah Diterbitkan:
30 Juni 2024

ABSTRACT

The primary function of mobile robots is to transport various loads, including their own weight and additional cargo. Ensuring adequate torque in the wheel motors is crucial for effective load-bearing and movement. This study investigates the load-carrying capabilities of the TT DC gearbox motor, a popular and cost-effective choice for small robots. A mobile robot equipped with four TT DC gearbox motors and employing skid steering locomotion was constructed for this purpose. The robot featured a container designed to carry sand, and its load capacity was tested by gradually increasing the weight until the robot could no longer move. Experimental results showed that the maximum load the robot could carry on a flat surface was 4000 grams, which corresponds to 1000 grams per 5 cm diameter wheel, driven by a stall torque of 0.08336 Nm (0.85 kg.cm). This finding is consistent with the motor's specified stall torque of 0.8 kg.cm at 6V. These results suggest that the maximum load of a mobile robot can be predicted using the motor's stall torque specification and the wheel radius through the total tractive effort (TTE) formula. This study offers valuable insights into estimating the performance limits of DC gearbox motors used in driving mobile robots.

Keywords: Mobile robot load, Stall torque, TT DC Motor.

PENDAHULUAN

Beberapa contoh mobile robot seperti traktor otomatis [1], robot gudang untuk distribusi [2], *robot assistive delivery* [3], atau *self-driving car* [4], selalu bergerak dengan membawa beban, baik beban komponen-komponennya sendiri dan atau benda kerja yang dipindahkannya. Pada *self-driving car* motor harus menahan dan menggerakkan beban dari mobil itu sendiri dan beban tambahan seperti penumpang atau barang. Traktor harus mampu menggerakkan beban kendaraan sendiri, pengemudi, dan beban yang dikerjakan atau tanah yang dibajak. Sedangkan pada robot di gudang harus mampu memindahkan beban paket secara kontinu. *Robot assistive delivery* dirancang untuk membantu pekerja pos membawa paket berat di lingkungan perkotaan yang kompleks. Selain harus memperhitungkan faktor beban, ada faktor faktor lain yang harus diperhitungkan agar motor dapat bergerak, seperti koefisien gesek jalan yang dilalui oleh robot, percepatan yang dibutuhkan agar motor mampu bergerak, atau juga ketika robot harus bergerak menanjak harus diperhitungkan juga kemiringannya dan gaya yang diperlukan.

Semua hal ini berhubungan langsung dengan torsi yang dapat dihasilkan oleh motor, dan torsi maksimum yang harus dilalui agar motor mampu bergerak [5]. Penggunaan motor yang kurang tepat, seperti kurang torsi, kurang dayanya atau bahkan kurang kecepatannya dapat menimbulkan masalah seperti motor yang *overheat*, motor macet, mogok atau tidak mau berjalan sama sekali, dan tentunya motor akan rusak [6,7].

Perhitungan untuk torsi pada mobil atau kendaraan berbeda dengan perhitungan torsi pada motor sendiri, ada sejumlah faktor yang harus diperhitungkan untuk menentukan torsi maksimum yang diperlukan. Faktor-faktor ini adalah:

a. Rolling Resistance

Rolling Resistance atau tahanan guling adalah gaya lawan yang harus diatasi oleh motor akibat gerak gelinding antara roda dan permukaan gerak kendaraan. Hambatan ini bergantung pada koefisien gesekan gelinding yang bervariasi tergantung pada bahan ban dan kekasaran permukaan gerak [5].

$$RR = GVW \times C_{\mu} \quad (1)$$

Dimana RR = Rolling Resistance (N)
 GVW = Gross Vehicle Weight (N)
 C_{μ} = Koefisien Rolling Resistance

Tabel 1. Koefisien Rolling Resistance [5]

Permukaan Kontak (Kondisi)	C_{μ}
Semen (baik/sedang/buruk)	0.010/0.015/0.020
Kayu (kering/berdebu/basah)	0.010/0.005/0.001
Aspal (baik/sedang/buruk)	0.012/0.017/0.022
Kerikil (baik/sedang/buruk)	0.015/0.022/0.037
Tanah (halus/berpasir)	0.025/0.037
Lumpur (keras/sedang/lunak)	0.037/0.090/0.150
Rumput (keras/lunak)	0.055/0.075
Pasir (keras/lunak/gundukan)	0.060/0.150/0.300

b. Grade Resistance

Grade Resistance adalah bentuk gaya gravitasi, yang cenderung menarik kendaraan ke belakang saat menaiki permukaan miring. Resistansi tanjakan dapat dihitung sebagai berikut: [5]

$$GR = GVW \times \sin \theta \quad (2)$$

Dimana GR = Grade Resistance (N)
 GVW = Gross Vehicle Weight (N)
 θ = Sudut kemiringan permukaan

c. Acceleration Force

Gaya akselerasi adalah gaya yang membantu kendaraan mencapai kecepatan yang telah ditentukan dari keadaan diam dalam jangka waktu tertentu. Gaya percepatan dapat dihitung menggunakan: [5]

$$FA = m \times a \quad (3)$$

$$m = \frac{GVW}{g} \quad (4)$$

Dimana FA = Gaya percepatan (N)
 m = Massa kendaraan (kg)
 GVW = Gross Vehicle Weight (N)
 g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
 a = Percepatan (m/s²)

Setelah mendapatkan semua gaya yang mempengaruhi kendaraan, maka dapat ditentukan TTE atau *Total Tractive Effort*, yaitu total gaya yang dibutuhkan untuk memindahkan kendaraan dengan karakteristik yang diinginkan yang merupakan jumlah total dari 3 gaya yang mempengaruhi kendaraan [5]:

$$TTE = RR + GR + FA \quad (5)$$

Dimana TTE = Total Tractive Effort (N)
 RR = Rolling Resistance (N)
 GR = Grade Resistance (N)
 FA = Force Acceleration (N)

Torsi yang diperlukan pada roda penggerak akan menjadi torsi yang dibutuhkan oleh motor penggerak untuk hasilkan karakteristik penggerak yang diinginkan. Torsinya adalah [5]:

$$\tau = R_f \times TTE \times r_{wheel} \quad (6)$$

Dimana τ = Torsi (Nm)
 R_f = Resistance factor atau factor gesekan yang memperhitungkan kerugian gesekan antara bantalan, as, dan bagian lain dalam motor
 TTE = Total Tractive Effort (N)
 r_{wheel} = radius roda (m)

Faktor gesekan memperhitungkan kerugian gesekan antara roda dan as roda dan hambatan pada bantalan motor. Nilai tipikal berkisar antara 1,1 dan 1,15 (atau 10% hingga 15%).

Ketika torsi total yang diperlukan sudah dihitung perlu diperiksa apakah roda dari kendaraan tersebut mampu menyalurkan torsi yang dibutuhkan, yaitu torsi maksimum yang dapat disalurkan oleh roda perlu diperhitungkan. Torsi maksimum tersebut adalah [5]:

$$T_{max} = (\mu \times GVW \times f \times r_{wheel}) / 2 \quad (7)$$

Dimana:

T_{max} = Torsi yang dibutuhkan agar kendaraan mau bergerak (Nm)
 GVW = Gross Vehicle Weight (N)
 μ = Koefisien gesek
 f = Pecahan sesuai jumlah motor penggerak, contoh: menggunakan 4 motor: $\frac{1}{\text{jumlah motor penggerak}} = \frac{1}{4}$

Tabel 2. Koefisien gesek (μ) [8]

Material	Koefisien gesek (μ)
Karet pada semen	0.68
Karet pada kayu	0.95
Plastik pada semen	0.6
Plastik pada kayu	0.7

METODE PENELITIAN

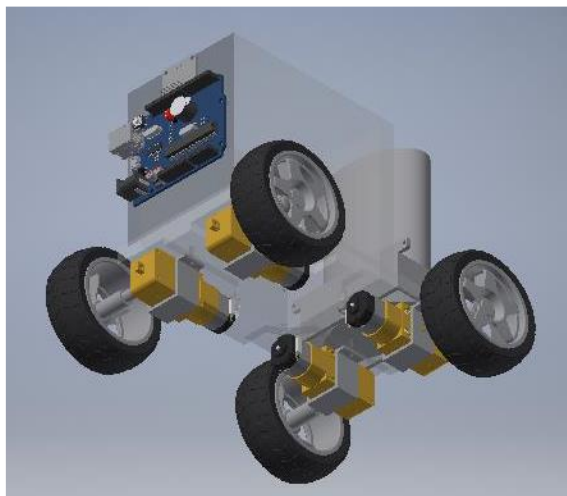
Pada penelitian ini digunakan TT motor yang merupakan motor DC dengan gearbox yang beroperasi pada 3 sampai 6 V dan populer

digunakan pada robot-robot kecil. Spesifikasi motor ini ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi TT motor [9]

Rated Voltage	3~6V
Continuous No-Load Current	150mA $\pm$ 10%
Minimum Operating Speed (3V)	90 $\pm$ 10% RPM
Minimum Operating Speed (6V)	200 $\pm$ 10% RPM
Stall Torque (3V)	0.4 kg.cm
Stall Torque (6V)	0.8 kg.cm
Gear Ratio	1:48
Body Dimensions	70 $\times$ 22 $\times$ 18 mm
Wires Length	200mm & 28 AWG
Weight	30.6g

Untuk memperoleh data kemampuan mobile robot untuk mengangkat beban, didesain sebuah mobile robot dengan *skid steer locomotion* beroda empat yang dikontrol dengan Arduino Uno seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Roda yang dipakai berdiameter 5 cm. Robot mempunyai kontainer yang dapat diisi dengan pasir sampai berat maksimum yaitu ketika torsi motor sudah tidak dapat menggerakkan *mobile robot*. Untuk mendapatkan GVW, robot ditimbang bersama dengan beban pada sebuah timbangan digital. Dari desain dibuat robot beroda dengan empat buah TT DC motor seperti ditunjukkan pada Gambar 2, 3, dan 4.



Gambar 1. Desain *mobile robot* untuk tes beban



Gambar 2. *Mobile robot* tampak atas



Gambar 3. *Mobile robot* tampak bawah



Gambar 4. *Mobile robot* tampak belakang dengan Arduino Uno

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mobile robot yang sudah dirangkai, kemudian diuji dengan cara menggerakannya maju pada jalan datar seperti sejauh 200cm/2m dengan penambahan beban berupa pasir secara bertahap hingga *mobile robot* tidak dapat berjalan lagi. Data yang didapat adalah waktu yang diukur menggunakan *stopwatch* dari pengukuran lama *mobile robot* mencapai titik yang ditentukan dari titik awal, dan kuat arus yang didapat dari pembacaan data current sensor

pada aplikasi arduino IDE, seperti Gambar 5. Kuat arus yang digunakan adalah kuat arus ketika kondisi *mobile robot* sudah stabil yaitu 4s setelah mulai berjalan. Hasil uji robot pada jalan datar diberikan pada Tabel 4.

```
14:30:15.377 -> Current:      1791.80 mA
14:30:15.377 ->
14:30:15.441 -> Current:      1991.10 mA
14:30:15.441 ->
14:30:15.583 -> Current:      1927.70 mA
14:30:15.583 ->
14:30:15.676 -> Current:      1797.00 mA
14:30:15.676 ->
14:30:15.787 -> Current:      1690.20 mA
14:30:15.787 ->
14:30:15.881 -> Current:      1588.90 mA
14:30:15.881 ->
14:30:15.974 -> Current:      1687.00 mA
14:30:15.974 ->
14:30:16.099 -> Current:      1450.70 mA
14:30:16.099 ->
14:30:16.192 -> Current:      1324.10 mA
14:30:16.192 ->
```

Gambar 5. *Mobile robot* tampak belakang dengan Arduino Uno

Tabel 4. Hasil pengujian robot pada jalan datar

Beban (gr)	Kuat Arus (A)		Waktu (s)
	Awal (mA)	Stabil (mA)	
954	1402.6	873.5	4.64
	1669.4	776.3	4.84
	1520.8	862.9	4.62
1500	1621.3	872.5	4.85
	1822.4	849.5	4.88
	1850.3	761.8	5.03
2000	1942.9	999.9	5.4
	1630.1	958.5	5.52
	1696.4	918.1	5.64
2500	1804	1020.8	5.99
	1908	1139.6	5.97
	1806	1206.7	5.92
3000	1973.3	1297.4	6.53
	2061	1178.8	6.66
	2101.7	1222.9	6.54
3500	2047	1520.1	8.25
	2141.2	1719.1	8.88
	2096.3	1704	8.55
4000	2067.6	2031.5	0
	2075	2108.7	0
	2071	2073.6	0

Untuk mencari torsi pada *mobile robot* perlu dicari terlebih dahulu besar gaya yang mempengaruhi *mobile robot* dengan menggunakan persamaan (1), (2), (3), (4) dan (5). Koefisien tahanan guling (C_μ) yang digunakan adalah 0.015, karena jalan yang digunakan berupa semen dengan kondisi cukup baik/sedang. Torsi yang dibutuhkan agar *mobile robot* mau bergerak dicari dengan persamaan (6). R_f atau faktor kerugian diambil angka terbesar, karena motor yang digunakan motor

pasaran/umum yang paling murah, dengan besar $R_f = 15\%$ atau 1.15, contoh:

Diketahui :

Massa/ $m = 954\text{g} = 0.954\text{kg}$

Sudut kemiringan Jalan/ $\theta = 180^\circ$

Percepatan Gravitasi Bumi/ $g = 9.807\text{ m/s}^2$

Waktu/ $t = 4.64\text{s}$

Koefisien tahanan guling/ $C_\mu = 0.015$

Jarak tempuh *mobile robot*/ $s = 200\text{cm} = 2\text{m}$

Jari-jari roda/ $r = 2.5\text{cm} = 0.025\text{m}$

Faktor Kerugian/ $R_f = 1.15$

Ditanya :

Torsi/ $\tau = ?$ (Nm)

Jawab :

$\tau = R_f \times TTE \times r_{\text{wheel}}$

$TTE = \times RR + GR + FA$

1. $RR = GVW \times C_\mu$ $RR = m \times g \times C_\mu$ $RR = 0.954\text{kg} \times 9.807\text{ m/s}^2 \times 0.015$

$RR = 0.14034\text{ N}$

2. $GR = GVW \times \sin\theta$

$GR = m \times g \times \sin 180$

$GR = 0.954\text{kg} \times 9.807\text{ m/s}^2 \times 0$

$GR = 0\text{ N}$

3. $FA = m \times a$

dengan $a = \Delta v / \Delta t = s / t.t = 2\text{m} / (4.64\text{s}) (4.64\text{s}) = 0.0929\text{ m/s}^2$

$FA = 0.954\text{ kg} \times 0.0929\text{ m/s}^2$

$FA = 0.08862\text{ N}$

4. $\tau = R_f \times (RR + GR + FA) \times r$

$\tau = 1.15 \times (0.14034\text{ N} + 0\text{ N} + 0.08862\text{ N}) \times 0.025\text{m}$

$\tau = 0.00658\text{ Nm}$

Untuk perhitungan dengan variabel lain dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perhitungan torsi yang diperlukan *mobile robot* pada jalan datar

Massa (gr)	RR (N)	GR (N)	FA (N)	Daya (W)	Torsi (Nm)
954	0.14034	0	0.08862	4.368	0.00658
			0.08145	3.882	0.00638
			0.08939	4.315	0.0066
1500	0.22066	0	0.12754	4.363	0.01001
			0.12597	4.248	0.00997
			0.11857	3.809	0.00975
2000	0.29421	0	0.13717	4.999	0.0124
			0.13127	4.793	0.01223
			0.12575	4.591	0.01207
2500	0.36776	0	0.13935	5.104	0.01458
			0.14029	5.698	0.01461
			0.14267	6.034	0.01467
3000	0.44132	0	0.14071	6.487	0.01673
			0.13527	5.894	0.01658
			0.14028	6.115	0.01672
3500	0.51487	0	0.10285	7.601	0.01776
			0.08877	8.596	0.01735

			0.09576	8.52	0.01756
4000	0.58842	0	0	10.15	0.01692
			0	10.54	0.01692
			0	10.37	0.01692

Setelah mendapatkan perhitungan torsi yang diperlukan agar *mobile robot* dapat bergerak, maka dapat dicari torsi maksimum yang mampu dipindahkan oleh sebuah motor dan roda, nilai ini dapat dicari menggunakan persamaan (7), dengan besaran koefisien gesek antara roda karet dengan jalan berupa semen mengikuti Tabel 2 yaitu 0.68, contoh:

Diketahui:

Jari-jari roda/ $r = 2.5 \text{ cm} = 0.025 \text{ m}$

Koefisien Gesek jalan/ $\mu = 0.68$

$f = 1/4 = 0.25$ (karena motor yang bekerja ada 4 maka beban dibagi terhadap 4 motor)

Percepatan gravitasi bumi/ $g = 9.807 \text{ m/s}^2$

Massa/ $m = 954 \text{ g} = 0.954 \text{ kg}$

Ditanya:

Torsi maksimum/ $T_{\max} = ?$ (Nm)

Jawab:

$$T_{\max} = (\mu \times GVW \times f \times r_{\text{wheel}}) / 2$$

$$T_{\max} = (\mu \times m \times g \times f \times r_{\text{wheel}}) / 2$$

$T_{\max}$

$$= \frac{(0.68 \times 0.954 \text{ kg} \times 9.807 \text{ m/s}^2 \times 0.25 \times 0.025 \text{ m})}{2}$$

$$T_{\max} = 0.01988 \text{ Nm}$$

Untuk perhitungan dengan beban lain dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Perhitungan torsi maksimum *mobile robot* pada jalan semen

Beban (gr)	Torsi maksimum (Nm)
954	0.01988
1500	0.03126
2000	0.04168
2500	0.0521
3000	0.06252
3500	0.07294
4000	0.08336

Maka didapatkan pada tegangan 5V, pada kenyataannya didapatkan torsi maksimum atau *stall torque* sebesar 0.08336 Nm untuk sebuah TT DC motor. Untuk kemampuan mengangkat bebannya untuk sebuah motor yaitu $4000/4 = 1000 \text{ gr}$ per motor. Hasil *stall torque* ini mendekati spesifikasi motor, yaitu pada 6V *stall torque* adalah 0.08 Nm [9]. Namun pada fabrikasi *mobile robot* yang diperlukan adalah dari data spesifikasi motor dapat ditentukan berapa kemampuan menggerakkan bebannya, sehingga motor yang dipilih adalah motor yang

tepat [10]. Sehingga perhitungan dapat ditarik mundur jika *mobile robot* dipasang 4 motor dengan *stall torque* 0.08 Nm, maka didapatkan dari rumus:

$$m = \frac{T_{\max} \times 2}{\mu \cdot g \cdot f \cdot r_{\text{wheel}} \times 2} = \frac{0.08 \times 2}{0.68 \times 9.807 \times 0.25 \times 0.025} = 3.84 \text{ kg}$$

Maka kemampuan memindahkan beban maksimum dengan pemakaian 4 buah TT motor adalah kira-kira 3.84 kg atau mendekati 4 kg. Namun tentu saja pada beban tersebut *mobile robot* tidak dapat bergerak, sehingga beban maksimum yang dapat dipindahkan oleh *mobile robot* secara aman sebesar $0.8 \times 3.84 = 3 \text{ kg}$.

SIMPULAN DAN SARAN

Pada penelitian ini dilakukan studi eksperimen untuk mendapatkan beban yang dapat dipindahkan oleh *mobile robot* menggunakan penggerak motor DC. Torsi maksimum yang didapatkan dari eksperimen mendekati spesifikasi motor yang diberikan, sehingga dapat dikonfirmasi dengan rumus torsi maksimum, dengan mengetahui *stall torque* dapat diestimasi beban maksimum yang dapat dipindahkan oleh *mobile robot*. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan berbagai macam tipe motor DC dan mengkonfirmasi apakah formula ini masih cukup akurat untuk mengestimasi kemampuan *mobile robot* untuk memindahkan beban.

REFERENSI

- [1] Zhang, C., & Noguchi, N. (2017). Development of a multi-robot tractor system for agriculture field work. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 79-90.
- [2] Bogue, R. (2016). Growth in e-commerce boosts innovation in the warehouse robot market. *Industrial Robot: An International Journal*, 43(6), 583-587.
- [3] Lee, D., Kang, G., Kim, B., & Shim, D. H. (2021). Assistive delivery robot application for real-world postal services. *IEEE Access*, 9, 141981-141998.
- [4] Badue, C., Guidolini, R., Carneiro, R. V., Azevedo, P., Cardoso, V. B., Forechi, A., ... & De Souza, A. F. (2021). Self-driving

- cars: A survey. Expert systems with applications, 165, 113816.
- [5] Chauhan, S. (2015). Motor torque calculations for electric vehicle. International journal of scientific & technology research, 4(8), 126-127.
- [6] Kopp, N., Toliyat, H. A., & Kliman, G. B. (2018). Handbook of Electric Motors.
- [7] Hughes, A., & Drury, B. (2019). Electric motors and drives: fundamentals, types and applications. Newnes.
- [8] University of Florida (2018). EML2322L -- friction coefficients. (n.d.).
<https://mae.ufl.edu/designlab/Class%20Projects/Background%20Information/Friction%20coefficients.htm> (diakses 20 Mei 2023)
- [9] Adafruit. (2018). DC Gearbox Motor - "TT Motor" - 200RPM - 3 to 6VDC.
<https://www.adafruit.com/product/3777>. (diakses 20 Mei 2023)
- [10] Dhani, H. (2021). Development of a Bioinspired NugalBot for Precision Seeding of Rice. Mississippi State University.