

RANCANG BANGUN KURSI RODA ELEKTRIK UNTUK KONDISI NAIK TURUN TANJAKAN

Rafiuddin Syam & Mustari

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Jl. Perintis Kemerdekaan km.10 Tamalanrea

Email: rafiuddin@unhas.ac.id

Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang

Jl. Perintis Kemerdekaan km.10 Tamalanrea

Abstract

This study aims to find out/design and electronic wheelchair that can go up and down a slope, as an aid facility for people with disabilities and elderly people. The wheelchair uses a relay motor control program applied in a microcontroller controlling a DC Motor. This study is intended to improve the writer's skills in designing electric wheelchairs that can go up and down a slope. In terms of academic purpose, it is expected that this research can provide additional knowledge for students, especially the students of Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Hasanuddin University about wheelchair design that can be beneficial in increasing production through automation in the field of science and technology. The electric wheelchair is equipped with a microcontroller that can receive instructions from a mover stick. It also has a visual equipment that can facilitate the wheelchair user. The instruction from the mover stick will be directly sent because it is connected to the microcontroller by using a serial cable. The results reveal that the manual wheelchair stick / drive shaft driven directly by the user sends instructions to the microcontroller in accordance with the desired wheelchair movement. The signal will be forwarded to the driver that will drive the motor. In this system, the mover stick functions as a user interface connected to the control system. The control system consists of several electronic chains that function to control the electric wheelchair equipped with components of interface input/output and a driver as the actuator.

Keyword : *wheelchairs, mobile robots, design / manufacturing.*

PENDAHULUAN

Kursi roda adalah alat bantu yang digunakan oleh orang yang mengalami kesulitan berjalan oleh penyakit, cedera, maupun cacat. Ketika beberapa individu dengan keterbatasan gerakan dapat terbantu dengan kursi roda standar, atau dengan keterbatasan gerakan lainnya mengalami kesulitan atau mustahil untuk dapat mengoperasikan kursi roda standar. Kursi roda cerdas didisain untuk menyediakan kemudahan bagi pemakainya, seperti memastikan bepergian tanpa bentrokan/tubrukan, membantu kinerja dari otomatis

mengantarkan pemakai kelokasi tertentu.

Menurut data Susenas (Survey Sosial Ekonomi Nasional) tahun 2000, difabel di Indonesia mencapai 1,46 juta penduduk yaitu sekitar 0,74 % dari total penduduk Indonesia (197 juta jiwa) pada tahun tersebut. Persentase difabel di daerah pedesaan sebesar 0,83 %. Lebih tinggi dibanding dengan persentase di daerah perkotaan sebanyak 0,63 %.

Sedangkan menurut Badan Kesehatan Dunia (WHO) belakangan memprediksikan bahwa satu dari 10 orang Indonesia adalah difabel.

Meningkat dibandingkan hasil Quick survey WHO tahun 1979, yang menyimpulkan bahwa difabel di Indonesia mencapai 3,11 persen. Ini jauh lebih tinggi dibandingkan data SUSENAS. Dalam hal penelitian tentang kursi roda, Para peneliti bidang robotika mengklasifikasikan kebidang mobile robot. Dimana robot kursi roda merupakan robot medis yang berfungsi sebagai alat bantu untuk penderita lumpuh dan lanjut usia (lansia).

Penelitian lainnya mengenai kursi roda yang dilakukan oleh Jauhar Wayunindho, yaitu menciptakan kursi roda listrik yang dikemudikan dengan gerakan mata, sehingga orang yang lumpuh total mudah untuk menggunakannya. Kursi roda ini menjadikan posisi retina mata pemakai sebagai pengganti joystick untuk mengendalikan kecepatan dan arah kursi roda itu. Namun penelitian tentang rancang bangun kursi roda untuk yang dapat berjalan diatas tanjakan masih sangat sedikit di Indonesia, sehingga penulis memilih judul yang bertemakan kursi roda sebagai *mobile robot*. Adapun inisiatif penulis memilih judul juga diinspirasi dari ketertarikan dengan aplikasi robot, Negara Indonesia sudah banyak melahirkan anak bangsa mengikuti kejuaraan kompetensi robotik Internasional, khususnya aplikasi dalam bidang *mobile robot*.

Namun penulis disini memilih langsung merancang bangun sebuah kursi roda, sekaligus mekanis-mekanis penggerakannya, seperti bangunan bentuk kursi, batang dudukan rel kursi, rangka segi tiga dudukan roda bantu, serta memasang rantai/batang ulir pengantar sebagai mekanisme penggerak *mobile robot* karena inovasi mekanisme inilah yang kami lakukan, adapun hasil rancangan kami, belum jadi secara utuh sampai terbentuk sebuah kursi roda yang bisa kami

tampilkan, namun secara struktur mekanismenya sudah mengarah pada tujuan.

Adapun tujuan dari penelitian ini, adalah :

1. Membuat rangka segitiga sama sisi pada rancang bangun kursi roda elektrik yang dapat naik turun tanjakan
2. Membuat dudukan yang ditopang dengan sistim rel batang ulir
3. Membuat batang poros roda utama
4. Membuat batang dudukan rantai pengantar/pemutar rangka segitiga sama sisi

Tenaga Putar Listrik Pada Roda (electric powered wheel chair)

Mobile robot berarti robot yang dapat bergerak ke tempat lain, dengan jarak yang agak jauh. [Katsuhiko Ogata, Edi Lesono, 1993]. Teknologi robotika beberapa tahun terakhir terus mengalami perkembangan yang signifikan, seiring dengan semakin banyaknya kemudahan yang dapat diperoleh dari penggunaan teknologi ini. Robot memberikan kemudahan untuk pekerjaan di daerah yang berbahaya misalnya, pekerjaan bawah laut, pertambangan dibawah tanah, pengukuran gas di daerah gunung berapi dan lain sebagainya. Jenis-jenis *Mobile robot* di golongan ke dalam beberapa tipe, antara lain: (Pakpahan S, 1994) Robot memiliki berbagai macam konstruksi, diantaranya adalah:

1. *Land Vehicles*.
Land Vehicles, merupakan mobile robot yang menggunakan penggerak roda, kaki atau rel/lintasan.
2. *Flying Robot (Robot Terbang)*.

Flying Robots, merupakan mobile robot dengan penggerak atau sayap yang menyerupai helikopter, pesawat, balon maupun serangga atau burung.

3. *Under Water Robot (Robot dalam air).*

Boat Robots, merupakan jenis robot berupa perahu motor yang dikendalikan melalui komputer.

4. *Submarine Robots.*

Submarine Robots, merupakan kapal selam yang dikendalikan dengan mikroprosesor sehingga menyerupai robot.

Pada tahun 1991 di pusat penelitian dan pengembangan rehabilitasi departemen veteran affairs, Washington DC, James M. Ford dan J. Sheredos telah mengembangkan kursi roda dengan sistem kontrol ultrasonik. Kursi roda tersebut mereka namakan *Ultrasonic Head Controlled Wheelchair [UHCW]*



Gambar 1. *Ultrasonic Head Controlled Wheelchair*

Sumber : James M Ford [1995]

Para peneliti berharap, penelitian dan pengembangan kursi roda dapat mengantisipasi meningkatnya jumlah pasien lanjut usia dan *handicap* yang memerlukan bantuan dan perawatan medis. Sementara itu perkiraan dari *United State Bureau of Census* 1993, populasi lanjut usia di Indonesia

diproyeksikan antara tahun 1990-2023 akan naik 414%, suatu angka tertinggi di seluruh dunia. Dan pada tahun 2020 Indonesia diperkirakan akan menempati urutan ke-4 jumlah lanjut usia paling banyak sesudah Cina, India dan Amerika Serikat.

Persamaan Dasar *Mobile Robot*

$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = B(q)\tau + J^T(q)\lambda$
Dimana :

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} ; \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \text{ dan } \ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix}$$

$$F_{(x)} = m \cdot a_x$$

$$F_{(y)} = m \cdot a_y$$

$$\tau_{(\theta)} = I \cdot \ddot{\theta}$$

$$B(q)\tau = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

$$J^T(q) = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ -\cos \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\ddot{q} = \dot{g}(q) \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} + g(q) \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix}$$

Kursi Roda

Kursi roda adalah alat bantu yang digunakan oleh orang yang mengalami kesulitan berjalan menggunakan kaki, baik dikarenakan oleh penyakit, cedera, maupun cacat. Alat ini digerakan dengan menggunakan tangan, atau dengan didorong oleh pihak lain.

Mekanik robot memiliki konstruksi mekanik yang lebih rumit dibanding

dengan yang berkemampuan navigasi saja.

Aktuator yaitu motor DC magnet permanen [DC-MP], motor DC brushless [DC-BL], motor DC Servo [DC-SV].

Pada motor DC terdapat 2 bagian utama, yaitu bagian yang tetap dan menghasilkan medan magnet dari koilnya yang disebut STATOR dan bagian yang berputar disebut ROTOR atau armature berupa koil dimana arus listrik mengalir.

Roda gigi di definisikan sebagai roda penerus daya, atau roda yang mentransmisikan gerak atau putaran dari penggerak ke yang digerakkan.

Adapun karakteristik roda gigi lurus adalah :

1. Mempunyai permukaan jarak bagi yang berbentuk silindris.
2. Digunakan untuk memindahkan tenaga di antara as-as yang sejajar.

Rasio Transmisi Pada Motor :

Rasio transmisi pada motor adalah:

$$i_1 = \frac{Z_1}{Z_2} \text{ dan } i_2 = \frac{Z_3}{Z_4}$$

dimana :

Z_1 = Jumlah Gigi Gir Motor

Z_2 = Jumlah Gigi Gir A_1

Z_3 = Jumlah Gigi Gir A_2

Z_4 = Jumlah Gigi Gir B

Putaran Output adalah :

$$n_2 = n_1 \times i$$

dimana : putaran input n_1 .

$$n_2 = n_3$$

$$n_4 = n_3 \times i_2$$

Kecepatan pada roda adalah :

$$v_1 = \frac{\pi d_1 n_1}{60} \quad (m/s)$$

Kecepatan kursi roda adalah :

- Tanpa gesekan dan beban :

$$V = \pi \cdot d \cdot N$$

$$N = \frac{V}{\pi \cdot d}$$

$$\omega = \frac{2\pi N}{60}$$

- Dengan beban kursi roda :

$$V = \pi \cdot d \cdot N$$

$$N = \frac{V}{\pi \cdot d}$$

$$\omega = \frac{2\pi N}{60}$$

- Dengan beban maksimum

$$V = \pi \cdot d \cdot N$$

$$N = \frac{V}{\pi \cdot d}$$

$$\omega = \frac{2\pi N}{60}$$

Torsi beban

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$$

$$F_2 = \frac{F_1 \cdot r_1}{r_2}$$

Dimana :

$$F_1 = m_{\text{tot}} \times \text{gravitasi}$$

$$\tau_2 = \frac{Z_3}{Z_4} \tau_1 \eta$$

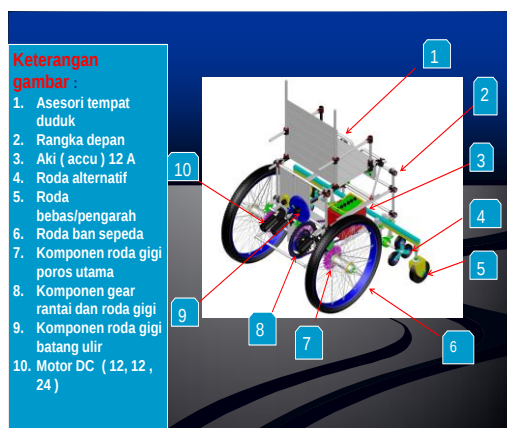
$$\tau_3 = \frac{Z_1}{Z_2} \tau_2 \eta$$

Bantalan adalah suatu bagian komponen permesinan yang dapat menumpuh suatu beban radial dan aksial, tetapi tetap memberikan keleluasaan gerak relatif antara dua elemen dalam sebuah mesin.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan juli 2010 sampai juni 2011 di Laboratorium Kontrol dan Robotika Jurusan Mesin pada Fakultas Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin Universitas Hasanuddin, dan Politeknik Negeri Ujung Pandang.

Disain kursi roda elektrik yang dapat naik turun tanjakan dapat dilihat pada gambar 2 berikut :



Gambar 2. Disain kursi roda elektrik yang dapat naik turun tanjakan

Secara umum dalam rancang bangun kursi roda elektrik terdiri dari perancangan dan pembuatan. Tahap perakitan dilakukan proses perancangan, maka proses berikutnya adalah proses pembuatan / perakitan.

Adapun proses pembuatan terdiri dari dua tahap, yaitu : Pembuatan rangka dan Pembuatan / pemasangan mekanisme penggerak.

Prosedur pengerjaan komponen kursi roda :

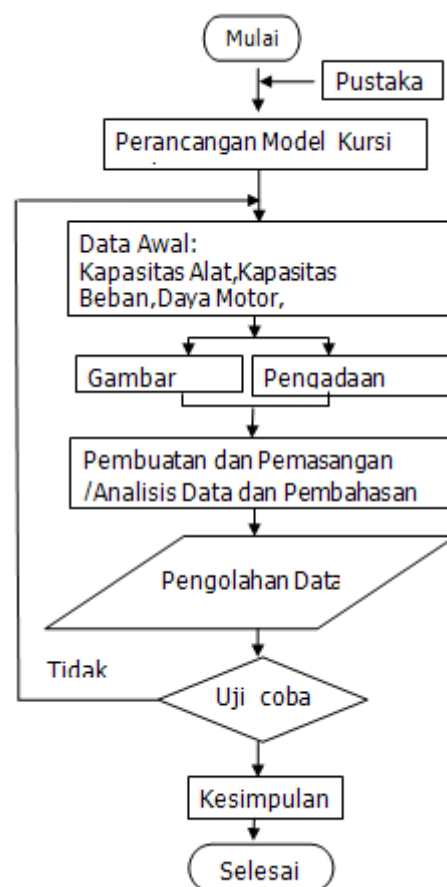
1. Memotong batang pipa stainless 42 cm x 6 batang.
2. Memotong batang pipa Stainless 2,5 m x 2 batang.
3. Membuat Engsel sebagai penghubung antara batang-batang.

Perakitan rangka kursi roda dapat dilihat pada gambar 3 berikut :



Gambar 3. Perakitan rangka kursi roda

Diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar 4 berikut :



Gambar 4. Diagram alir penelitian

HASIL DAN DISKUSI

A. Perhitungan Dinamika Kursi Roda Elektrik Yang Dapat Naik Turun Tanjakan.

- Untuk Gerak Nonholonomic :
 $\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0$
- Pada Posisi Awal:
 $x = 1, y = 1, \theta = 0^\circ$
- Dalam Persamaan Kecepatan *Mobile Robot* :

$$\dot{q} = g(q)^T \cdot u(t)$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.68 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Kecepatan sudut roda :

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \frac{v}{r}$$

$$= \frac{1.68}{0.26}$$

$$= 6.46 \text{ rad / s}$$

B. Perhitungan Kinematika Pada Massa Mobile Robot Kursi Roda Elektrik. Untuk Roda Depan :

$$R_{rd} = \frac{1}{2} \left(\frac{m \cdot (d)}{L} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{120 \cdot 0.26}{0.40} \right)$$

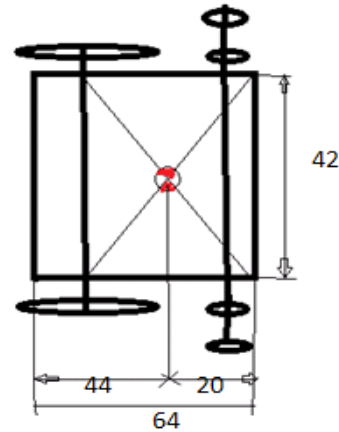
$$= 39 \text{ kg}$$

Untuk Roda Belakang :

$$R_{rb} = \frac{1}{2} (m - 2R_{rd})$$

$$= \frac{1}{2} (120 - 39)$$

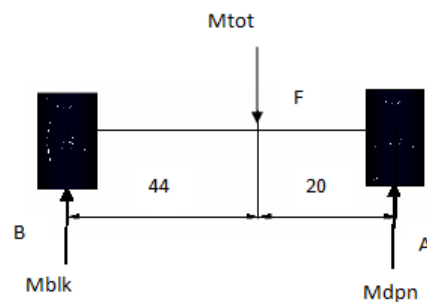
$$= 21 \text{ kg}$$



Gambar 4. Analisa struktur

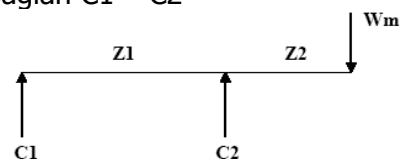
C. Perhitungan Statika Pada Titik Berat Kursi Roda Elektrik.

- Dimensi Berat Kursi Roda Elektrik



Gambar 5. Analisa momen gaya

- a. Beban Kursi Roda didistribusikan ke Sisi Kanan dan Kiri Rangka Bagian C1 – C2



Gambar 6. DBB bagian C1 – C2

$$\Sigma F_{C1} = 0$$

$$W_m(Z1 + Z2) - C2 \cdot Z1 = 0$$

$$60(44 + 20) - C2 \cdot 44 = 0$$

$$C2 = 87 \text{ kg}$$

$$\Sigma M_{C2} = 0$$

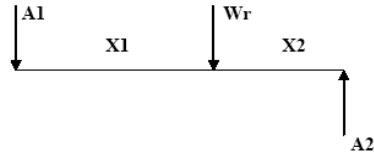
$$W_m \cdot Z2 + C1 \cdot Z1 = 0$$

$$60 \cdot 20 + C1 \cdot 44 = 0$$

$$C1 = 27,3 \text{ kg}$$

- b. Beban Kursi Roda dan pemakainya didistribusikan ke Sebelah Kanan dan Kiri Rangka

Bagian A1 – A2

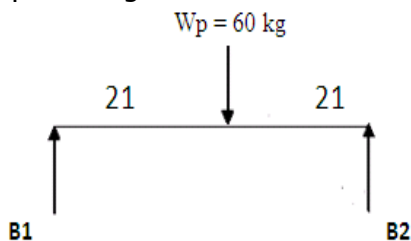


Gambar 7. DBB bagian A1 – A2

$$\begin{aligned}\Sigma F A1 &= 0 \\ W_r \cdot X1 - A2(X1 + X2) &= 0 \\ 120 \cdot 44 - A2(44 + 20) &= 0 \\ A2 &= 82,5 \text{ kg} \\ \Sigma M A2 &= 0 \\ A1(X1 + X2) - W_r \cdot X2 &= 0 \\ A1(44 + 20) - 120 \cdot X2 &= 0 \\ A1 &= 37,5 \text{ kg}\end{aligned}$$

- c. Beban Pemakai didistribusikan ke Samping Kanan dan Kiri Rangka.

Bagian B1 – B2 , beban pemakai
Wp = 60 kg



Gambar 8. DBB bagian B1 – B2

$$\begin{aligned}\Sigma F B1 &= 0 \\ 60 \cdot 21 - B2 \cdot 42 &= 0 \\ B2 &= 30 \text{ kg} \\ B1 &= B2 = 30 \text{ kg, karena jarak tumpuan sama}\end{aligned}$$

- Dimensi Perhitungan tinggi titik Berat Kursi Roda Elektrik

- a. Jarak titik berat dari poros roda depan :

$$L_f = \frac{m_{bl} \cdot L}{m_{tot}} = \frac{82,5 \cdot 640}{120} = 0,44 \text{ m}$$

- b. Jarak titik berat dari poros roda belakang :

$$L_r = \frac{m_{dpn} \cdot L}{m_{tot}} = \frac{87 \cdot 640}{120} = 0,46 \text{ m}$$

- c. Jarak titik berat dari sisi kiri :

$$L_{ki} = \frac{m_{ka} \cdot L}{120} = \frac{27,3 \cdot 420}{120} = 0,09 \text{ m}$$

- d. Jarak titik berat dari sisi kanan :

$$L_{ka} = \frac{m_{ki} \cdot 420}{120}$$

$$H = r + f$$

$$\sin \theta = r/l$$

$$\sin \theta = 0,26/0,064$$

$$\sin \theta = 4,063$$

$$\theta = 2,65$$

$$H_f = \frac{m_f \cdot L_t - m_t \cdot L_r}{m \cdot \tan \theta}$$

$$= \frac{87 \cdot 0,64 - 120 \cdot 0,46}{120 \cdot \tan 2,65}$$

$$= 0,09 \text{ m}$$

- D. Perhitungan Statika Kestimbangan Pada Lintasan Miring Kursi Roda Elektrik.

- a. Perhitungan berat kursi roda

$$W = m \times g = 120 \times 9,81$$

$$W = 1177,2 \text{ kgm/s}^2$$

- b. Perhitungan gaya-gaya reaksi

❖ Untuk arah sumbu y

$$W_y = W \cos \theta = 1177,2 \times \cos 30^\circ$$

$$W_y = 1019,5 \text{ kgm/s}^2$$

❖ Untuk arah sumbu x

$$W_x = W \sin \theta = 1177,2 \times \sin 30^\circ$$

$$W_x = 588,6 \text{ kgm/s}^2$$

❖ Pada gaya gesek

$$F_r = \mu \cdot W_y = 0,014 \times 1019,5$$

$$F_r = 14,27 \text{ kgm/s}^2$$

- c. Kestimbangan gaya-gaya Kursi Roda

$$\sum F_x = F_t - F_r - F_a - W_x = 0,$$

Dengan mengabaikan gaya hambat ($F_a = 0$), maka;

$$F_{tmin} = F_r + W_x$$

$$= 14,27 + 588,6$$

$$F_{tmin} = 602,9 \text{ kgm/s}^2$$

Sehingga,

$$\sum F_x = m \times a = F_t - F_r - W_x$$

$$F_t = F_r + W_x = 24 + 602,9$$

$$F_t = 626,9 \text{ kgm/s}^2$$

Jadi gaya dorong yang dibutuhkan adalah 626,9 N

- E. Perhitungan Statika Kestimbangan Pada Lintasan Datar Kursi Roda Elektrik.

- ❖ Untuk Perhitungan berat kursi roda.

$$W = m \times g = 120 \times 9,81$$

$$W = 1177,2 \text{ kgm/s}^2$$

$$N_{Wy} = N = W = 1177,2 \text{ kgm/s}^2$$

$$N_{Fr} = cr. N = 0,014 \times 1177,2$$

$$N_{Fr} = 16,5 \text{ kgm/s}^2$$

- ❖ Kestimbangan gaya-gaya

$$\sum F_x = F_t - F_r - F_a = 0, (F_a = 0)$$

maka ;

$$F_{tmin} = F_r = 16,5 \text{ kgm/s}^2$$

Sehingga ;

$$\sum F_x = m \cdot a_x$$

$$= F_t - F_r$$

$$\begin{aligned} F_t &= m \cdot a_x + F_r = 24 + 16,5 \\ &= 40,5 \text{ kgm/s}^2 \end{aligned}$$

- F. Perhitungan Transmisi Roda Gigi Pada Kursi Roda Elektrik

- a. Putaran Output

$$n_2 = n_1 \times i_1$$

$$= 60 \times 0,735$$

$$n_2 = 44,1 \text{ rpm}$$

dimana : putaran input [n_1] = putaran output yaitu 60 rpm

$$\begin{aligned} n_2 &= n_3 \quad n_4 = n_3 \times i_2 \\ &= 44,1 \times 0,233 \end{aligned}$$

$$n_4 = 10,27 \text{ rpm}$$

- b. Kecepatan pada roda

$$v_1 = \frac{\pi d_1 n_1}{60} (m/s)$$

$$v_1 = \frac{3,14 \cdot 0,52 \cdot 10,27}{60} = 0,28 m/s$$

- c. Kecepatan kursi roda

- ❖ Tanpa gesekan dan beban

$$V = n \cdot d \cdot N$$

$$N = \frac{V}{\pi \cdot d} = \frac{0,28}{3,14 \cdot 0,52} = 0,17 \text{ rpm}$$

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan kinematika dan dinamis, baik secara eksperimental maupun secara numerik, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Sistem kontrol yang digunakan merupakan sistem kontrol otomatis, dimana kedua roda penggerak

dikontrol secara terpisah melalui manual stick analog kontrol.

2. Mekanisme penggerak menggunakan roda gigi, rantai, bantalan dan poros batang ulir, serta motor DC. Sehingga pemeliharaan lebih mudah dan tahan lama serta mempunyai efisiensi tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

Gholipour, S.M. Dehghan, M. NiliAhmadabadi, 2002. *Dynamic Tracking Control of Nonholonomic Mobile Robot with Model Reference Adaptation for Uncertain Parameters*. University of Tehran. www.ut.ac.ir.

Anonim, 2003. *Power Wheelchairs and User Safety*, The National Institute for Rehabilitation Engineering. www.warwick.com.

Anonim, 2006. *Pertambahan Jumlah Lanjut Usia Indonesia Terpesat di Dunia*. Kompas. <http://www.kompas.com/health/news/0203/26/011528.htm>.

Anonim, 2008. *Mahasiswa ITS Ciptakan Kursi Roda Bersensor Retina Mata*. <http://www.kapanlagi.com/h/0000219728.html>.

Bonita Sawatzky, 2002. *Wheeling in the New Millennium: The history of the wheelchair and the driving forces in wheelchair design today*. Department of Rehabilitation Science and Technology. <http://www.wheelchairnet.org/index.html>.

Charles L. Philips, Royce D. Harbor, R. J. Widodo, 1998. *Sistem Kontrol* (Terjemahan). Prenhallindo, Jakarta.

Endra Pitowarno, 2006. *Robotika, Disain, Kontrol, dan Kecerdasan Buatan*. ANDI, Yogyakarta.

Harahap, B., Negoro. 2004. *Ensiklopedia Matematika*. Erlangga, Jakarta.

Kiyokatsu Suga, Sularso, 1991. *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*. PT. Pradnya Paramita, Jakarta.

Katsuhiko Ogata, Edi Lesono, 1993. *Teknik Kontrol Automatik* [terjemahan]. Jilid 1, Erlangga, Jakarta.

Mabd M, 2008. *Jumlah Lanjut Usia di Indonesia*. Depsos RI. <http://www.depsos.go.id/modules.php?name=News&file=article&sid=701>.

Pakpahan S, 1994. *Kontrol Otomatik*. Cetakan Kedua. Erlangga, Jakarta.

Pushin Kachroo, 2007. *Mobile Robot*. Department of Electrical and Computer Engineering. Virginia Tech. <http://www.ee.vt.edu/~pushkin.com>.