

EVALUASI DINAMIKA TITIK BERAT KURSI RODA PADA KEMIRINGAN JALAN 20° BERDASARKAN SIMULASI DAN PERHITUNGAN ANALITIS

Usman^{1*}, Faisal Habib², Hairun Apriadi Ramadhan S¹, Angga Tegar Setiawan¹

¹ Jurusan Teknik Perawatan Mesin, Politeknik Industri Logam Morowali
Jl. Trans Sulawesi, Morowali, Sulawesi Tengah 94974.

² Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia
Jl. Urip Sumoharjo Km. 5, Makassar, Sulawesi Selatan 90231.

*Email: usmanhaya46@gmail.com

Abstrak

Menurut data BPS dan Kementerian Sosial RI (2022), lebih dari 5,3 juta penyandang disabilitas fisik di Indonesia mengalami keterbatasan mobilitas, terutama saat menggunakan kursi roda di medan menanjak. Ketidakstabilan kursi roda manual pada kemiringan tinggi menjadi tantangan utama yang berisiko menyebabkan kehilangan keseimbangan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi dinamika pergeseran titik berat kursi roda pada kemiringan jalan hingga 20°, melalui simulasi dan perhitungan analitis. Metode yang digunakan meliputi studi literatur, survei jenis kursi roda, observasi medan jalan miring, serta analisis gaya dan kinematika sistem. Hasil menunjukkan bahwa posisi titik berat tetap berada dalam zona aman saat sudut kemiringan berubah, dengan distribusi gaya reaksi yang stabil di kisaran 87,63–93,26 kg. Tekanan pada roda tetap dalam batas aman, serta tidak menimbulkan deformasi. Konsumsi daya tertinggi tercatat 144,56 Watt saat menanjak dan turun drastis pada medan datar dan menurun. Desain ini dinilai adaptif, aman, dan efisien untuk digunakan oleh penyandang disabilitas di wilayah urban yang memiliki kontur jalan yang bervariasi.

Kata kunci: kursi roda, disabilitas fisik, stabilitas tanjakan.

PENDAHULUAN

Penyandang disabilitas merupakan bagian dari masyarakat yang memiliki hak yang sama dalam mengakses fasilitas publik, termasuk alat bantu mobilitas yang aman dan efisien. Berdasarkan data terbaru dari Badan Pusat Statistik (BPS) dan Kementerian Sosial Republik Indonesia, pada tahun 2022 tercatat lebih dari 22 juta orang penyandang disabilitas di Indonesia, di mana sekitar 5,3 juta di antaranya mengalami disabilitas fisik yang secara langsung memengaruhi kemampuan mobilitas sehari-hari (BPS, 2022; KEMENSOS, 2022). Salah satu alat bantu utama yang digunakan oleh penyandang disabilitas fisik adalah kursi roda.

Namun demikian, kursi roda manual konvensional masih menghadapi berbagai kendala dalam penggunaannya di lingkungan perkotaan, khususnya di jalan dengan kemiringan yang curam. Ketidakstabilan saat menaiki tanjakan, serta kebutuhan akan bantuan orang lain dalam kondisi tersebut, merupakan tantangan nyata bagi pengguna kursi roda (Hartono and Widodo, 2021; Kurniawan, 2023). Kondisi ini menunjukkan perlunya desain kursi roda yang lebih adaptif dan stabil, khususnya untuk kemiringan jalan hingga 20°.

Penelitian ini dilakukan untuk merespons kebutuhan tersebut melalui perancangan kursi roda ringan yang stabil dan aman digunakan pada medan menanjak. Perancangan dilakukan dengan pendekatan studi literatur, observasi lapangan, dan analisis sistem kinematika guna menghasilkan desain dengan kerangka dinamis yang dapat menyesuaikan sudut kemiringan. Studi ini juga menghitung kapasitas beban maksimum serta gaya tekan minimum yang diperlukan agar kursi roda dapat menanjak dengan efisien. Diharapkan, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam pengembangan alat bantu mobilitas adaptif yang lebih inklusif di lingkungan perkotaan.

Penyandang disabilitas merupakan kelompok individu yang mengalami keterbatasan fungsional yang dapat membatasi partisipasi mereka dalam berbagai aspek kehidupan sosial. Disabilitas tidak semata-mata dipandang sebagai kondisi fisik atau mental yang berbeda, melainkan sebagai hasil interaksi kompleks antara keterbatasan individu dengan berbagai hambatan lingkungan dan sosial. Pandangan modern menekankan bahwa disabilitas bersifat multidimensional, mencakup gangguan fungsi tubuh, keterbatasan dalam melakukan aktivitas, hambatan dalam berpartisipasi, serta pengaruh dari faktor lingkungan dan sosial (UN, 2022).

Kursi Roda

Kursi roda adalah alat bantu mobilitas yang dirancang untuk meningkatkan kemampuan gerak bagi individu yang mengalami keterbatasan fisik, seperti pengguna dengan gangguan pada fungsi tungkai, pasien dalam masa pemulihan, lanjut usia, atau mereka yang berisiko tinggi mengalami cedera saat berjalan. Kursi roda berperan penting dalam menunjang kemandirian dan aksesibilitas bagi penyandang disabilitas (Setiawan and Pramudito, 2022).



Gambar 1. Desain Kursi roda

Desain kursi roda perlu disesuaikan dengan data antropometri pengguna, khususnya dalam konteks populasi Indonesia. Berdasarkan standar ISO 7176-5 (2008) dan referensi antropometri lokal, dimensi utama kursi roda ditetapkan sebagaimana tercantum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi Dasar Kursi Roda Berdasarkan ISO 7176-5 (2008)

No	Uraian	Dimensi (mm)
1	Panjang maksimum	1400
2	Lebar	800
3	Tinggi total	1000
4	Tinggi kursi	700
5	Lebar tempat duduk	500
6	Tinggi dudukan dari tanah	500
7	Tinggi sandaran tangan	200
8	Panjang tempat duduk	450
9	Tinggi sandaran punggung	300

Ramp dan Standardisasinya

Ramp atau bidang landai merupakan elemen aksesibilitas penting dalam ruang publik, dirancang untuk memfasilitasi mobilitas pengguna kursi roda dan individu dengan keterbatasan fisik lainnya. Ramp digunakan sebagai alternatif dari tangga, memungkinkan pergerakan yang lebih aman dan inklusif. Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No. 14 Tahun 2017 tentang Persyaratan Kemudahan Bangunan Gedung, kemiringan maksimum ramp dalam bangunan tidak boleh melebihi 8% atau sekitar 4,76°, sedangkan untuk area luar ruangan, batas kemiringan ramp yang disarankan adalah maksimum 6% atau sekitar 3,43°. Ketentuan ini tidak termasuk pada bagian transisi awal dan akhir ramp seperti curb ramps dan landings (Kementerian PUPR, 2017; WHO, 2023).

Titik Berat (*Center Of Gravity*)

Titik berat atau *center of gravity* (COG) merupakan titik hipotetik di mana seluruh berat suatu benda dianggap terpusat, dan seimbang dalam semua arah. Dalam sistem mekanik seperti kendaraan ringan atau kursi roda, COG menjadi komponen vital dalam menjaga kestabilan, terutama saat menghadapi perubahan medan seperti tanjakan, permukaan tidak rata, atau gerakan akseleratif dan deseleratif. Posisi COG yang tidak ideal, seperti terlalu tinggi atau terlalu jauh dari pusat geometri roda, dapat meningkatkan risiko terguling (*rollover*) dan menurunkan efisiensi kontrol gerak (Tavakoli and al., 2022).

Secara konseptual, apabila distribusi massa benda diketahui, maka posisi titik berat dalam dua dimensi dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\bar{\Sigma X} = \frac{\Sigma X_n}{n}, \bar{\Sigma Y} = \frac{\Sigma Y_n}{n} \quad 1$$

Gaya Tekan

Gaya tekan adalah besarnya gaya yang bekerja pada suatu permukaan dibagi dengan luas area kontakannya. Konsep ini penting dalam analisis kestabilan kursi roda, terutama saat digunakan pada permukaan miring, karena tekanan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan deformasi atau selip pada ban kursi roda. Tekanan dihitung dengan rumus:

$$P = \frac{F}{A} \quad 2$$

Dimana P adalah tekanan (N/m²), F gaya normal (N), dan A adalah luas bidang kontak (m²) (Beer et al., 2020).

Daya Gerak (*Power Output*)

Daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kursi roda tergantung pada gaya dorong, kecepatan gerak, dan koefisien gesek antara ban dan permukaan. Rumusnya:

$$P = F \cdot v \cdot \mu_k \quad 3$$

Dimana P adalah daya (Watt), F adalah gaya dorong (N), v kecepatan (m/s), dan μ_k adalah koefisien gesek kinetik. Nilai μ_k untuk karet terhadap permukaan keras biasanya sekitar 0,2 (Serway and Jewett, 2022).

Momen dan Reaksi

Momen atau torsi merupakan besaran yang menggambarkan kecenderungan suatu gaya untuk menyebabkan rotasi terhadap titik atau sumbu tertentu. Dalam sistem mekanik seperti kendaraan ringan atau kursi roda, momen digunakan untuk mengevaluasi kestabilan dan efisiensi distribusi beban (Barari and Esmailzadeh, 2022).

Sementara itu, gaya reaksi adalah gaya-gaya yang muncul sebagai tanggapan terhadap beban eksternal pada titik-titik tumpuan sistem. Dalam kondisi kesetimbangan statik, total gaya dan total momen yang bekerja pada sistem harus bernilai nol, sebagaimana dijelaskan oleh Zhang dan Wang (2021) dalam studi tentang analisis gaya reaksi pada sistem mobilitas bantu. Reaksi ini bisa berbentuk gaya vertikal, horizontal, maupun momen reaksi tergantung pada jenis tumpuan dan arah gaya yang bekerja.

$$\Sigma F = 0, \Sigma M = 0 \quad 4$$

Penerapan analisis momen dan gaya reaksi sangat penting dalam perancangan alat bantu mobilitas modern, termasuk sistem kursi roda, di mana titik tumpu roda dan distribusi berat harus

dianalisis untuk menghindari selip dan terguling saat melewati medan miring (Gholami and Maroufi, 2023).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dinamika pergeseran titik berat kursi roda pada berbagai kontur jalan guna meminimalisasi risiko pengguna jatuh atau terguling saat menggunakannya. Kursi roda ini dirancang sebagai alternatif dengan biaya terjangkau bagi kalangan menengah ke bawah, serta memiliki keunggulan berupa sistem stabilisasi otomatis yang dapat menyesuaikan dengan kontur jalan. Selain itu, dalam desain ini disertakan beberapa simulasi dan hasil analisis perhitungan yang dapat dijadikan referensi untuk pengembangan lebih lanjut.

METODOLOGI PENELITIAN

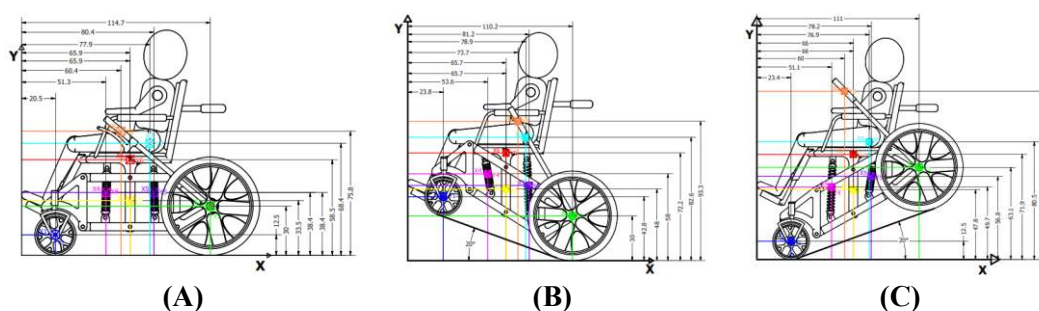
Metodologi penelitian ini disusun secara sistematis untuk menganalisis dinamika pergeseran titik berat kursi roda pada kemiringan jalan 20° , melalui pendekatan kombinitif antara simulasi menggunakan software Autodesk Inventor dan analisis perhitungan untuk memverifikasi hasil yang diperoleh. Langkah awal dilakukan melalui studi pustaka guna membangun landasan teoretis tentang desain mekanik, kestabilan dinamis, dan prinsip distribusi beban pada kursi roda, dengan merujuk pada standar internasional ISO 7176-5, publikasi WHO, serta berbagai literatur ilmiah relevan (Beer et al., 2020; ISO 7176-5, 2008; WHO, 2023). Selanjutnya, observasi lapangan dilakukan untuk mengidentifikasi tantangan aktual penggunaan kursi roda di medan menanjak melalui dokumentasi teknis dan wawancara langsung terhadap pengguna. Data antropometri pengguna serta spesifikasi geometris standar kursi roda dikumpulkan dan digunakan sebagai dasar perancangan geometri sistem (ISO 7176-5, 2008).

Pada tahap berikutnya, dilakukan validasi awal melalui perhitungan gaya dan momen statik untuk mengetahui distribusi beban pada kondisi miring, termasuk gaya tekan, gaya gesek, dan torsi akibat kemiringan. Hasil perhitungan ini kemudian divalidasi lebih lanjut menggunakan simulasi dinamis berbasis Autodesk Inventor, yang memungkinkan pemodelan gerak dan analisis titik pusat massa dalam berbagai skenario kemiringan. Simulasi dilakukan di Laboratorium Komputer, Politeknik Industri Logam Morowali dengan skenario variasi sudut dan berat beban untuk menilai respons struktural terhadap perubahan medan. Evaluasi akhir difokuskan pada keseimbangan dinamis, termasuk interaksi antara distribusi gaya dorong, koefisien gesek roda, dan kestabilan pusat massa, sebagaimana juga ditegaskan dalam pendekatan desain berbasis biomekanika (Beer et al., 2020; Kurniawan, 2023; Serway and Jewett, 2022; Setiawan and Pramudito, 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa Pergeseran Titik Berat (*Center Of Gravity*)

Dalam analisis ini, dilakukan pengukuran terhadap tiga kondisi jalan, yaitu permukaan datar, tanjakan, dan turunan. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk mengevaluasi perubahan atau pergeseran titik berat (*Center of Gravity*) pada desain kursi roda yang dirancang.

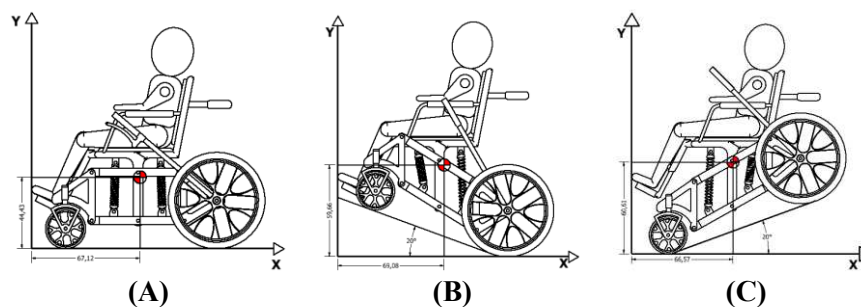


Gambar 2. Pengukuran jarak elemen terhadap sumbu X dan Y pada jalan (A) Datar, (B) Menanjak, (C) Menurun.

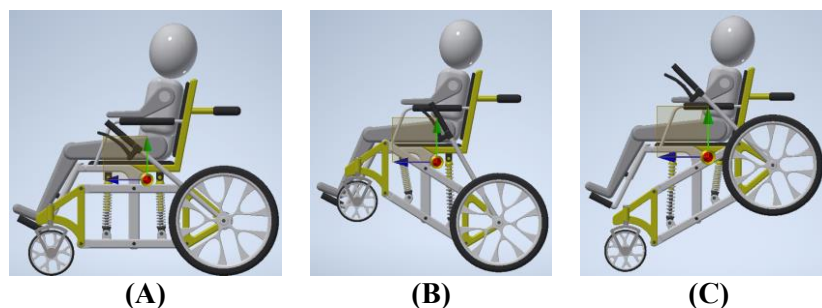
Tabel 2. Data pengukuran sumbu X dan Y setiap elemen pada jalan datar, menanjak, dan menurun

No	Nama Elemen	Massa (kg)	Datar		Menanjak		Menurun	
			Xn (cm)	Yn (cm)	Xn (cm)	Yn (cm)	Xn (cm)	Yn (cm)
1	Roda depan	1	20,5	12,5	23,8	42,8	23,4	12,5
2	Roda belakang + poros roda	3,88	114,7	30	110,2	30	111	63,1
3	Struktur rangka	9,29	65,9	33,5	65,7	48	66	47,8
4	Suspensi depan	1,5	51,3	38,4	53,5	58	51,1	49,7
5	Suspensi belakang	1,5	80,4	38,4	81,2	50,4	78,2	56,8
6	Kursi+pijakan kaki	5,08	65,9	58,5	65,7	72,2	66	71,9
7	Orang (P)	70	77,9	68,4	78,9	82,6	76,9	80,5
8	Tuas penggerak	1,01	60,4	75,8	73,7	93,3	60	115,1
Jumlah total (Σ)		93,26	537	355,5	552,7	477,3	532,6	484,9
Rata-rata ($\bar{\Sigma}$)		93,26	67,12	44,43	69,08	59,66	66,57	60,61

Berdasarkan data hasil pengukuran dimensi setiap komponen kursi roda pada Tabel 2., selanjutnya titik berat (*Center of Gravity*) dapat ditentukan menggunakan Persamaan 1., Sehingga diperoleh posisi titik berat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pergeseran titik berat terhadap sumbu X dan Y pada jalan (A) Datar, (B) Menanjak, (C) Menurun.



Gambar 4. Hasil simulasi pergeseran titik berat menggunakan Autodesk Inventor (A) Datar, (B) Menanjak, (C) Menurun.

Analisis pergeseran titik berat kursi roda pada tiga kondisi medan datar, menanjak 20°, dan menurun 20° menunjukkan bahwa meskipun terjadi perubahan posisi, titik berat tetap berada dalam batas stabil kerangka. Pada permukaan datar, titik berat berada pada $X = 67,12$ cm dan $Y = 44,43$ cm. Saat menanjak, titik berat bergeser ke $X = 69,08$ cm dan $Y = 59,66$ cm, sedangkan pada medan menurun tercatat di $X = 66,57$ cm dan $Y = 60,61$ cm. Visualisasi melalui skematik dua dimensi dan simulasi tiga dimensi mendukung temuan bahwa pergeseran tersebut tidak mengganggu keseimbangan sistem.

Hasil ini selaras dengan penelitian Luo et al. (2023) yang menyatakan bahwa stabilitas kursi roda sangat bergantung pada posisi pusat massa terhadap sumbu roda utama. Demikian pula, Togni et al. (2023) menegaskan bahwa posisi pusat massa yang tetap terpusat penting untuk menjaga kendali dan keamanan saat menghadapi permukaan miring. Dalam konteks ini, desain kursi roda yang diuji menunjukkan distribusi massa yang sesuai dan mempertahankan kestabilan dalam berbagai kondisi.

Akurasi pengukuran juga berada dalam batas toleransi. Menurut Chénier et al. (2023), kesalahan pelacakan pusat massa pada sistem kursi roda berada pada kisaran ± 33 mm untuk sumbu longitudinal dan ± 9 mm untuk lateral. Dengan nilai pergeseran dalam penelitian ini masih di bawah batas tersebut, maka hasil analisis dapat dinyatakan valid. Secara keseluruhan, desain kursi roda ini memenuhi kriteria keselamatan dan stabilitas untuk digunakan pada medan datar maupun berkelok.

Selanjutnya untuk menentukan reaksi yang terjadi saat kursi roda bergerak diberbagai perubahan kemiringan jalan dapat diperoleh dengan mengunkaa persamaan 4., sehingga diperoleh reaksi sebagaimana ditampilkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Hasil perhitungan reaksi pada jalan rata, menanjak, dan menurun

No	Kemiringan jalan	Reaksi titik A (kg)	Reaksi titik B (kg)	Total reaksi (kg)
1	Datar	46,15	47,1	93,26
2	Menanjak 20°	41,7	45,93	87,63
3	Menurun 20°	44,44	43,18	87,63

Tabel 3 menunjukkan distribusi gaya reaksi pada dua titik tumpu kursi roda (A dan B) dalam tiga kondisi medan. Pada permukaan datar, gaya terbagi hampir merata, yakni 46,15 kg di titik A dan 47,1 kg di titik B, dengan total beban 93,26 kg. Saat menanjak 20°, gaya di titik A menurun menjadi 41,7 kg dan titik B menjadi 45,93 kg, mengindikasikan pergeseran beban ke belakang. Sebaliknya, saat menurun 20°, titik A meningkat menjadi 44,44 kg dan titik B menurun menjadi 43,18 kg, menunjukkan perpindahan beban ke depan.

Sejalan dengan Choi et al. (2021), yang menyatakan bahwa redistribusi gaya akibat perubahan kemiringan merupakan respons alami sistem massa-rangka. Selama gaya reaksi tidak melebihi batas kapasitas struktur roda, kestabilan tetap terjaga. Desain kursi roda dalam penelitian ini terbukti mampu menyesuaikan distribusi gaya dengan perubahan medan tanpa mengganggu keseimbangan.

Total gaya reaksi pada permukaan miring tetap berada pada angka 87,63 kg, masih dalam batas wajar. Distribusi yang relatif seimbang antara titik A dan B menunjukkan bahwa desain kursi roda telah mempertimbangkan aspek kestabilan dan keselamatan secara efektif untuk penggunaan pada medan variatif.

Analisa Gaya Tekan Pada Roda

Pada tahap ini gaya tekan dapat diperoleh dengan mengunkaa persamaan 2., sehingga diperoleh gaya tekan pada roda sebagaimana ditampilkan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan gaya tekan roda pada jalan rata, menanjak, dan menurun

No	Kemiringan jalan	Roda Depan (N/m ²)	Roda Belakang (N/m ²)
1	Datar	141.478,59	57.756,37
2	Menanjak 20°	127.836,56	56.321,66
3	Menurun 20°	136.236,37	52.949,47

Tekanan pada roda kursi roda dipengaruhi oleh luas kontak antara roda dan permukaan jalan. Berdasarkan perhitungan, tekanan pada roda depan saat berada di permukaan datar mencapai 141.478,59 N/m², kemudian menurun menjadi 127.836,56 N/m² saat menghadapi tanjakan 20°, dan menjadi 136.236,37 N/m² pada kemiringan menurun 20°. Pada roda belakang, tekanan tercatat sebesar 57.756,37 N/m² pada kondisi datar, 56.321,66 N/m² saat menanjak, dan 52.949,47 N/m² saat

menurun. Penurunan tekanan ini menunjukkan adanya redistribusi beban akibat perubahan orientasi medan.

Distribusi tekanan tersebut sejalan dengan kajian van Dijk et al. (2024), yang meneliti distribusi beban antara roda depan dan belakang pada kursi roda selama pergerakan di berbagai kondisi medan menggunakan sensor inersia dan model prediksi. Studi tersebut menunjukkan bahwa pada medan miring, beban cenderung berpindah ke roda yang dominan menanggung gaya, terutama roda depan saat menurun dan roda belakang saat menaik. Meskipun terjadi pergeseran beban, distribusi tekanan tetap berada dalam batas toleransi material roda, sehingga tidak mengganggu stabilitas sistem secara keseluruhan. Temuan ini memperkuat kesimpulan bahwa desain kursi roda yang dianalisis memiliki respons tekanan yang adaptif terhadap kontur medan dan tetap aman digunakan.

Berdasarkan data yang diperoleh, nilai tekanan pada roda masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk operasional normal. Hal ini mengindikasikan bahwa rancangan kursi roda mampu menyesuaikan distribusi gaya tekan secara efektif dan mempertahankan kestabilan saat digunakan pada medan datar maupun miring.

Analisa Daya

Pada tahap ini analisa daya yang dibutuhkan dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 3., sehingga diperoleh daya sebagaimana ditampilkan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Hasil perhitungan daya yang digunakan

No	Kemiringan jalan	Daya (Watt)
1	Datar	57,45
2	Menanjak 20°	144,56
3	Menurun 20°	0

Berdasarkan tabel 3. Hasil perhitungan daya yang digunakan menunjukkan besarnya daya yang dikonsumsi oleh sistem kursi roda pada tiga kondisi medan. Pada jalan datar, konsumsi daya tercatat sebesar 57,45 Watt, yang diperlukan untuk mengatasi gaya gesek dan mempertahankan kecepatan gerak konstan. Sementara itu, pada kemiringan menaik 20°, daya meningkat signifikan menjadi 144,56 Watt karena sistem harus bekerja melawan gaya gravitasi untuk memungkinkan pergerakan ke atas.

Sebaliknya, pada kondisi menurun 20°, konsumsi daya tercatat 0 Watt. Hal ini disebabkan karena sistem tidak memerlukan tenaga dorong aktif, melainkan hanya mengandalkan gaya gravitasi dan sistem pengereman untuk mengatur laju gerak. Dengan demikian, tidak terjadi konsumsi energi mekanik oleh sistem penggerak selama kondisi penurunan tersebut berlangsung.

Penerapan Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil penelitian, kursi roda dengan sistem stabilisasi otomatis ini dapat digunakan oleh penyandang disabilitas fisik, terutama di wilayah perkotaan yang memiliki variasi kontur jalan. Sistem yang dirancang mampu menjaga kestabilan hingga sudut kemiringan 20°, sehingga risiko pengguna terjatuh atau terguling dapat ditekan. Desain kursi roda yang ringan dengan distribusi massa seimbang serta konsumsi energi yang efisien juga berpotensi dijadikan acuan bagi industri dalam memproduksi kursi roda dengan harga terjangkau, khususnya untuk masyarakat menengah ke bawah. Analisis mengenai pergeseran titik berat, distribusi gaya reaksi, dan kebutuhan daya memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan desain berikutnya, misalnya melalui penerapan sensor otomatis, penggunaan baterai hemat energi, dan pemilihan material yang ringan sekaligus kuat. Selain itu, rancangan ini mendukung program pemerintah maupun lembaga sosial dalam penyediaan alat bantu mobilitas yang lebih aman, nyaman, dan sesuai kebutuhan pengguna, sehingga dapat meningkatkan aksesibilitas dan kualitas hidup penyandang disabilitas.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis geometris, mekanis, dan simulatif terhadap desain kursi roda ringan, dapat disimpulkan bahwa sistem ini memiliki tingkat kestabilan yang baik untuk digunakan pada medan datar maupun miring hingga sudut 20°. Posisi titik berat tetap berada dalam zona tengah kerangka meskipun terjadi perubahan sudut kemiringan, sehingga risiko kehilangan keseimbangan atau terguling dapat diminimalkan. Hal ini menunjukkan bahwa desain telah memperhitungkan distribusi massa secara optimal dalam berbagai kondisi operasional.

Distribusi gaya reaksi pada dua titik tumpu (A dan B) menunjukkan pola yang seimbang, dengan total gaya tetap stabil di kisaran 87,63 kg saat menanjak dan menurun, dan 93,26 kg pada kondisi datar. Nilai tersebut menunjukkan bahwa struktur kursi roda mampu menopang beban secara efektif tanpa mengalami kelebihan muatan, sekaligus menjaga kestabilan statis sistem. Di sisi lain, tekanan pada roda depan dan belakang menurun secara proporsional terhadap perubahan medan, tetapi tetap berada dalam batas aman yang tidak menimbulkan deformasi atau kehilangan traksi, sesuai dengan batas toleransi material roda.

Konsumsi daya juga menunjukkan efisiensi kinerja sistem. Daya tertinggi tercatat sebesar 144,56 Watt saat menanjak, sedangkan pada jalan datar hanya memerlukan 57,45 Watt, dan kondisi menurun tidak membutuhkan daya aktif karena cukup mengandalkan sistem pengereman. Dengan mempertimbangkan aspek distribusi massa, stabilitas reaksi, tekanan roda, dan efisiensi energi, desain kursi roda ini dinilai layak, aman, dan adaptif untuk digunakan oleh penyandang disabilitas pada medan berkontur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Muslim Indonesia serta Ketua Program Studi Teknik Perawatan Mesin Politeknik Industri Logam Morowali atas dukungan dan penyediaan fasilitas laboratorium yang diberikan, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan sesuai dengan waktu yang telah direncanakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Barari, A., Esmailzadeh, E., 2022. Dynamic response and control of lightweight vehicles considering moment and weight distribution. *Journal of Mechanical Design* 144, 61401–61410. <https://doi.org/10.1115/1.4052020>
- Beer, F.P., Johnston, E.R., DeWolf, J.T., Mazurek, D.F., 2020. *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill Education.
- Chénier, F., Marquis, E., Fleury-Rousseau, M., 2023. PREPRINT-Tracking the whole-body centre of mass while seated in a wheelchair using motion capture.
- Choi, H., Lee, H., Choi, J., Moon, J., Jeong, J., Joo, D., Yoo, I., 2021. Pressure distribution in tilting and reclining wheelchairs with an air cushion: A pilot study. *Biomed Hum Kinet* 13, 121–127. <https://doi.org/10.2478/bhk-2021-0015>
- Gholami, M., Maroufi, M., 2023. Stability and support analysis of wheelchair systems on inclined surfaces. *Biomedical Engineering and Computational Mechanics* 12, 44–53.
- Hartono, D., Widodo, S., 2021. Desain ergonomis kursi roda untuk medan terjal. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri* 10, 112–120. <https://doi.org/10.25077/jrsi.v10n2.p112-120.2021>
- KEMENSOS, 2022. Laporan Data Penyandang Disabilitas Nasional. Pusdatin Kemensos. ISO 7176-5, 2008.
- Kurniawan, A., 2023. Analisis gaya dan stabilitas pada kursi roda di kemiringan jalan. *Jurnal Mekanika Terapan* 14, 35–44.
- Luo, H., Cao, X., Dong, Y., Li, Y., 2023. Simulation and experimental study on the stability and comfortability of the wheelchair human system under uneven pavement. *Front Bioeng Biotechnol* 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1279675>
- UN, 2022. Disability and Development Report 2022. UN.
- WHO, 2023. Global Report on Health Equity for Persons with Disabilities. WHO.
- Kementerian PUPR, 2017. Peraturan Menteri PUPR No. 14/PRT/M/2017 tentang Persyaratan Kemudahan Bangunan Gedung. PUPR.

- Serway, R.A., Jewett, J.W., 2022. *Physics for Scientists and Engineers*. Cengage Learning.
- Setiawan, M.A., Pramudito, R.D., 2022. Smart wheelchair system for slope environments: Design and simulation. *IEEE Access* 10, 1–10. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3188854>
- BPS, 2022. *Statistik Penyandang Disabilitas Indonesia 2022*. BPS.
- Tavakoli, M., al., et, 2022. A review of modeling and stability analysis of wheelchairs: Focus on center of gravity. *International Journal of Biomechanics* 59, 215–230.
- Togni, R., Zemp, R., Kirch, P., Plüss, S., Vegter, R.J.K., Taylor, W.R., 2023. Steering-by-leaning facilitates intuitive movement control and improved efficiency in manual wheelchairs. *J Neuroeng Rehabil* 20. <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01265-x>
- van Dijk, M.P., Heringa, L.I., Berger, M.A.M., Hoozemans, M.J.M., Veeger, D.J.H.E.J., 2024. Towards an accurate rolling resistance: Estimating intra-cycle load distribution between front and rear wheels during wheelchair propulsion from inertial sensors. *J Sports Sci* 42, 611–620. <https://doi.org/10.1080/02640414.2024.2353405>
- Zhang, Y., Wang, L., 2021. Analysis of Support Reactions in Mobility Assist Systems Using Static Equilibrium Models. *J Assist Technol* 15, 289–298. <https://doi.org/10.1108/JAT-03-2021-0005>