

Pembentukan Persamaan Model Becak Otomatis untuk Dua Kondisi Sistem Gerak Dinamika: Bagian I

The Derivation of Autonomous “Becak” Model Equation with Two Conditions for Dynamics Motion System: Part I

Noverina Alfiany^{1*}, Novrianti²

¹Jurusan Matematika, FMIPA, Universitas Andalas, Padang

²Program Studi Teknik Industri, STITEKNAS Jambi

*Corresponding author, e-mail: noverinaalfiany@sci.unand.ac.id/noverinaalfiany@gmail.com

ABSTRACT

The combination of kinematics and dynamics motion system is the entire motion system of the vehicle, both non-autonomous and autonomous vehicles. In the kinematic motion system, the longitudinal and lateral forces are neglected, so they can be eliminated from the equations of the motion system. However, in dynamic motion systems, all longitudinal and lateral forces must be analyzed to obtain the actual motion system. Finite Element Analysis (FEA) is a powerful method for analyzing and simulating the model equations that undergo the deformation. However, the analysis process can be carried out if a model equation has been obtained for all boundary conditions that correspond to actual conditions. In this study, modest Becak autonomous model equations were used to form a dynamics motion system with two conditions, namely conditions with and without the braking process. The scenario of the braking process is necessary to be added so that the later formed model equations can provide accurate simulation results to the real dynamics of the modest autonomous Becak model. Based on the derivation of the modest Becak model equation, in which various assumptions are applied to its dynamics motions system, it is found that several parameters can be omitted when the braking process occurs. In addition, this study also yields conclusions for certain characteristics of the modest Becak autonomous components that will be used in the next analysis and simulation process.

Keywords: Modest Becak autonomous model, Dynamics motion equations, Braking Process

ABSTRAK

Kombinasi sistem gerak kinematika dan dinamika merupakan keseluruhan sistem gerak pada kendaraan, baik kendaraan dengan pengemudi maupun kendaraan otonom. Pada sistem gerak kinematika, gaya longitudinal dan lateral yang terjadi diabaikan, sehingga dapat ditiadakan dalam persamaan sistem gerak. Namun pada sistem gerak dinamika, semua gaya longitudinal dan lateral yang terjadi harus dianalisis untuk memperoleh sistem gerak yang sebenarnya. Analisis Elemen Hingga (AEH) merupakan metode yang cukup mumpuni dalam melakukan analisis dan simulasi persamaan model yang mengalami perubahan bentuk atau deformasi. Namun, proses analisis dapat dilakukan jika telah diperoleh persamaan model yang mencakup semua kondisi batas yang sesuai dengan kondisi riil. Pada penelitian ini, model kendaraan otonom Becak sederhana digunakan untuk membentuk persamaan dinamika gerak dengan dua kondisi, yaitu kondisi dengan dan tanpa proses pengereman. Skenario proses pengereman perlu ditambahkan agar persamaan model yang terbentuk nantinya dapat memberikan hasil simulasi yang akurat dengan gerak dinamika riil model Becak otonom. Berdasarkan penurunan persamaan model Becak sederhana yang dilakukan, di mana beberapa asumsi diterapkan pada persamaan gerak dinamikanya, diperoleh bahwa beberapa parameter dapat dihilangkan dari persamaan dinamika gerak pada saat proses pengereman terjadi. Selain itu, penelitian ini juga menghasilkan kesimpulan untuk beberapa karakteristik komponen model Becak sederhana yang akan digunakan pada proses analisis dan simulasi berikutnya.

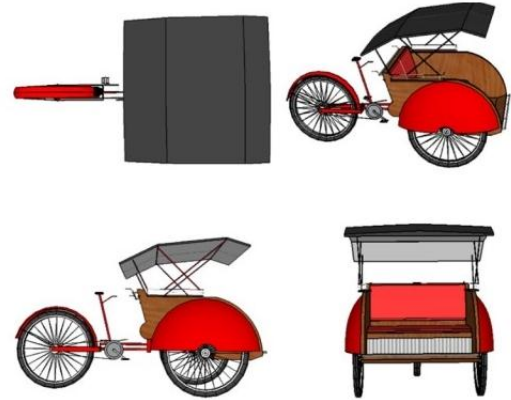
Kata kunci: Model Becak Otonom Sederhana, Persamaan Dinamika Gerak, Proses Pengereman

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara dengan keberagaman suku bangsa, budaya, adat istiadat, dan Bahasa. Keberagaman tersebut disebabkan oleh beberapa faktor, salah satu nya adalah keadaan transportasi dan komunikasi yang memberi pengaruh pada keberagaman budaya. Salah satu keberagaman budaya adalah keberagaman moda transportasi, yang mana di Indonesia dapat dilihat dari beragamnya bentuk, tipe, dan kegunaan moda transportasi tersebut. Meskipun Indonesia sudah dikategorikan sebagai negara maju pada tahun 2020 oleh WTO dalam bidang perdagangan [1], namun moda transportasi tradisional seperti “Becak” masih sering dijumpai diberbagai wilayah di Indonesia.

Becak yang dikenal sebagai moda transportasi roda tiga, merupakan alat transportasi yang dibentuk dari modifikasi sepeda atau sepeda motor pada bagian penumpangnya. Meskipun masih tergolong moda transportasi tradisional, namun Becak dikenal sebagai moda transportasi yang ramah lingkungan karena tidak menghasilkan polusi, baik udara maupun suara. Gambar 1 memperlihatkan skema Becak sederhana yang dibentuk dari sepeda dengan penambahan dua roda pada bagian penumpang [2]. Dinamika dan kinematika gerak Becak menyerupai dinamika dan kinematika gerak sepeda, namun terdapat perubahan bentuk awal pada dua roda depan ataupun pada dua roda belakang, yang menyebabkan perubahan dinamika dan kinematika geraknya.

Pada [3], sistem dinamika dan kinematika gerak Becak sederhana dibentuk untuk menganalisa sistem gerak Becak yang selanjutnya disimulasikan sebagai cetak biru sistem gerak Becak *autonomous*. Hasil analisa sistem gerak yang diperoleh memperlihatkan bahwa pada model Becak sederhana yang diajukan pada penelitian tersebut memiliki empat input penting, yaitu sudut rotasi *pivot* γ , sudut *steering* δ untuk kedua roda depan, kecepatan roda depan v_f , dan kecepatan roda belakang v_b . Model persamaan sistem gerak Becak sederhana tersebut juga disimulasikan pada simulator robot ROS *Gazebo*.



Gambar 1. Skema becak sederhana [2]

Meskipun pada penelitian terdahulu, sistematika gerak dan trajektori gerak untuk model otomatis Becak sederhana sudah dianalisa dan disimulasikan, namun analisis gerak yang meliputi keberadaan proses pengereman belum ditambahkan. Pada penelitian ini, analisis sistem gerak model Becak sederhana oleh Alfiany et al. [2,3] akan dilanjutkan dengan menambahkan analisis sistem gerak pada saat proses pengereman terjadi. Secara keseluruhan, analisis gerak dinamika model Becak sederhana akan dilakukan dengan menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH) atau dikenal dengan Analisis Elemen Hingga (AEH).

Proses analisa akan dibagi menjadi dua tahap, di mana tahap awal analisis yang dibahas pada artikel ini adalah tahap pembentukan persamaan gerak model Becak sederhana. Persamaan dinamika gerak model Becak otonom akan dibentuk dengan mengaplikasikan beberapa asumsi yang mungkin terjadi. Di mana nantinya akan diperoleh persamaan dinamika sistem gerak, struktur pembagian *Body* Becak, dan karakteristik seluruh komponen Becak, yang akan digunakan pada proses analisis dan simulasi dengan menggunakan MEH atau AEH berikutnya.

METODE ELEMEN HINGGA PADA ANALISIS REM KENDARAAN OTOMATIS

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) atau Analisis Elemen Hingga (*Finite Element Analysis*) merupakan metode yang umum digunakan pada

permasalahan dibidang teknik. Metode Elemen Hingga (MEH) adalah suatu teknik untuk memperoleh hampiran solusi pada permasalahan nilai batas di mana solusi eksak permasalahan tersebut sulit atau tidak dapat diperoleh. Analisis Elemen Hingga (AEH) merupakan salah satu teknik yang cukup mumpuni untuk memperoleh hampiran suatu permasalahan teknik dengan akurasi yang baik [4].

Salah satu penggunaan MEH pada bidang teknik adalah perhitungan dan analisa deformasi yang terjadi pada rem kendaraan dengan pengemudi ataupun kendaraan otomatis. Pada [5,6,7,8,9,10,11,12,13] MEH digunakan untuk menganalisa dan melakukan simulasi performa rem dengan berbagai skenario beban yang diberikan. Penulis melakukan simulasi gaya-gaya yang terjadi pada saat proses pengereman dengan model yang diselesaikan dengan bantuan *software*. Perhitungan nilai deformasi, koefisien *Von Mises*, *frictional stress*, *sliding distance*, dan *pressure* dilakukan untuk mendapatkan nilai akhir koefisien gesek yang terjadi pada kampas rem. Semua penelitian yang disebutkan di atas melakukan analisa sistem rem cakram pada model kendaraan otonom modern.

Selanjutnya, pada model kendaraan sederhana, Klug et al. [14] melakukan analisis sistem gerak dinamika sepeda dengan mempertimbangkan proses pengereman pada sepeda yang terfokus pada proses manuver. Penelitian ini menganalisis semua gaya yang terjadi pada roda depan dan roda belakang sepeda, yang diasumsikan akan mengalami perubahan pada saat proses manuver yang terjadi secara tiba-tiba. Perubahan ini dihubungkan dengan perubahan gaya-gaya yang disebabkan oleh proses pengereman. Pada [15] perilaku sistem pengereman sepeda dianalisis melalui eksperimen yang kemudian dilanjutkan dengan analisis kondisi batas (*wet and dry conditions*) pada sistem rem cakram.

SISTEM GERAK MODEL BECAK OTONOM SEDERHANA

Persamaan gerak kinematika model Becak sederhana dinyatakan oleh [2]

$$\dot{X} = V \cdot \cos(\Psi + \beta), \quad (1)$$

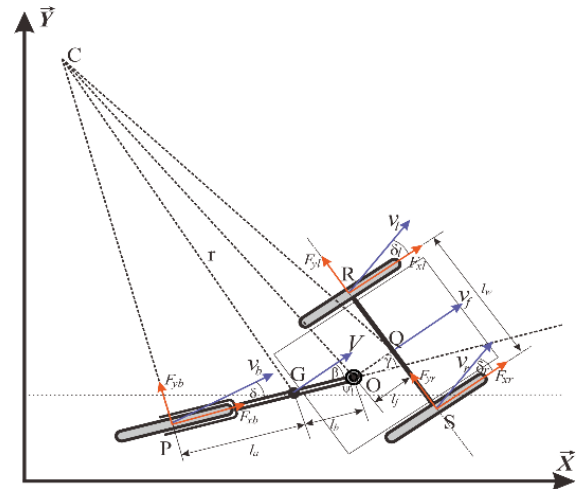
$$\dot{Y} = V \cdot \sin(\Psi + \beta), \quad (2)$$

$$\dot{\Psi} = \frac{V \cdot \cos \beta}{l_a + l_b + l_f} (\tan \gamma), \quad (3)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{l_f \cdot \tan \gamma}{l_a + l_b + l_f} \right), \quad (4)$$

$$V = \frac{v_b \cdot \cos \gamma + v_a}{2 \cos \beta}, \quad (5)$$

di mana $l_a, l_b, l_f, v_b, \cos \beta, \cos \gamma$, dan $\tan \gamma$ merupakan konstanta. Seluruh komponen yang merujuk pada parameter dipersamaan sistem gerak kinematika dan dinamika model Becak otonom sederhana ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Komponen gerak kinematika dan dinamika pada model Becak sederhana [3]

Sedangkan persamaan gerak dinamika model becak sederhana berdasarkan [3, 16] dinyatakan oleh

$$m[\dot{v}_x - \dot{\psi}v_y] = F_{xf} + F_{xb}, \quad (10)$$

$$m[\dot{v}_y + \dot{\psi}v_x] = F_{yf} + F_{yb}, \quad (11)$$

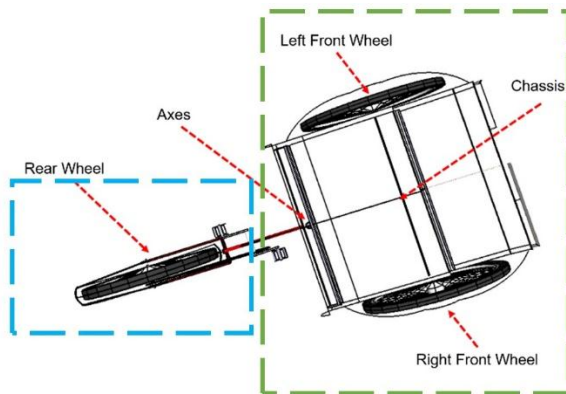
$$I_z \ddot{\psi} = l_f F_{yf} - l_b F_{yb}, \quad (12)$$

di mana indeks f dan b bersesuaian dengan roda depan dan roda belakang secara berurutan, serta indeks x dan y secara berurutan menyatakan arah longitudinal dan lateral untuk

kecepatan v maupun gaya F . Parameter m menyatakan massa kendaraan dan I_z merupakan momen inersia kendaraan pada sudut ψ .

Analisis gerak model Becak sederhana yang mempertimbangkan pengaruh akibat pengereman diaplikasikan pada persamaan gerak dinamikanya. Proses deformasi pada rem cakram dapat dianalisa dari semua gaya yang mengenai rem dengan menggunakan MEH/AEH terhadap persamaan dinamika sistem geraknya saja. Namun persamaan gerak kinematika dibutuhkan untuk melakukan simulasi trajektori model Becak sederhana, di mana proses pengereman disimulasikan secara bersamaan dengan simulasi sistem gerak model Becak sederhana, baik kinematik maupun dinamik.

Skema Body model Becak sederhana [2] dibagi menjadi empat bagian sebagaimana terlihat pada Gambar 3. Pembagian Body Becak sederhana merujuk pada [14] yang membagi sepeda sederhana menjadi roda depan, roda belakang, frame depan, dan frame belakang. Roda depan meliputi bagian roda kiri dan kanan (*left front* dan *right front*), *frame* depan meliputi roda kiri, roda kanan, *chassis*, dan *axes*, sedangkan roda belakang dan *frame* belakang hanya memuat roda belakang (*rear wheel*) saja.



Gambar 3. Pembagian *Body* model Becak sederhana: roda depan, roda belakang, *frame* depan (garis putus-putus hijau), dan *frame* belakang (garis putus-putus biru)

Massa pengendara pada model Becak sederhana ditiadakan, namun massa pada bagian penumpang diasumsikan sebagai jumlah massa bagian *frame* depan dan massa rata-rata muatan. Diasumsikan gaya lateral pada

roda (F_y) memuat parameter pegas-rem, yaitu *lateral stiffness* c_y dan *damping* d_y , yang dipengaruhi oleh defleksi ban y_t [14]

$$F_y = c_y y_t + d_y \dot{y}_t. \quad (13)$$

Selanjutnya, gaya longitudinal pada roda diasumsikan sebagai gaya longitudinal normalisasi yang terjadi pada ban, yaitu dengan menggunakan persamaan ban yang diajukan oleh Pacejka dan Besselink [15]

$$\frac{F_x}{F_y} = D \sin[C \cdot \tan^{-1}(B\kappa - E \cdot (\tan^{-1}(B\kappa)))], \quad (14)$$

di mana κ menyatakan *slip* yang terjadi pada roda depan maupun roda belakang, serta B, C, D , dan E merupakan suatu konstanta.

Pada saat proses pengereman terjadi, diasumsikan bahwa roda bagian depan akan berputar dengan bebas karena hilangnya pengaruh *slip* κ pada roda depan, sehingga mengakibatkan kecepatan Becak dapat dituliskan sebagai

$$v = v_f \cdot r, \quad (15)$$

di mana r menyatakan jari-jari roda, yang diasumsikan sama untuk kedua roda depan dan belakang. Namun, pada roda belakang, *slip* κ dapat dihitung dengan menggunakan formula

$$\kappa = \frac{v_f - v_r}{v_f}. \quad (16)$$

PEMBENTUKAN PERSAMAAN SISTEM GERAK DINAMIKA MODEL BECAK OTONOM SEDERHANA

Sistem persamaan gerak kinematika yang dipengaruhi oleh proses pengereman pada model Becak sederhana selanjutnya dibentuk dari asumsi pada persamaan (13) – (15). Pada persamaan (13), diasumsikan bahwa gaya lateral yang terjadi pada gerak dinamik roda model Becak sederhana akan selalu dipengaruhi oleh parameter pegas-rem dan defleksi ban. Sehingga gaya lateral roda F_y tidak dapat diabaikan untuk sistem gerak

pada keseluruhan bagian *Body* Becak sederhana, baik roda depan maupun belakang.

Selanjutnya, persamaan (14) yang merupakan normalisasi gaya longitudinal pada ban model Becak sederhana diasumsikan sebagai gaya longitudinal yang terjadi pada keseluruhan roda. Namun pada proses pengereman nilai *slip* pada roda depan dianggap tidak ada, karena diasumsikan roda depan akan mengalami perubahan sudut yang tidak terkendali. Sehingga gaya longitudinal yang terjadi pada roda depan F_{xf} dapat diabaikan.

Persamaan (15) selanjutnya disubstitusikan sebagai kecepatan yang terjadi pada saat proses pengereman dilakukan. Sehingga secara keseluruhan, persamaan sistem gerak dinamik yang terjadi pada model becak sederhana saat proses pengereman dilakukan, dapat dinyatakan oleh

$$m[(\dot{v}_f \cdot r) - \dot{\psi}(v_f \cdot r)] = F_{xb}, \quad (17)$$

$$m[(\dot{v}_f \cdot r) + \dot{\psi}(v_f \cdot r)] = F_{yf} + F_{yb}, \quad (18)$$

$$I_z \ddot{\psi} = l_f F_{yf} - l_b F_{yb}. \quad (19)$$

Pada saat proses analisis dan simulasi dilakukan, dua sistem persamaan akan digunakan secara simultan sesuai kondisi yang terjadi, yaitu

{Persamaan (10) – (12); Jika tidak terjadi proses pengereman
{Persamaan (17) – (19); Jika terjadi proses pengereman

Selanjutnya, dari proses pembentukan persamaan yang dilakukan, diperoleh karakteristik komponen-komponen model Becak sederhana yang akan digunakan dalam proses analisis dan simulasi nantinya dengan menggunakan MEH/AEH. Karakteristik tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Table 1. Karakteristik komponen model Becak sederhana

No	Komponen	Karakteristik	
		Tanpa Proses Pengereman	Dengan Proses Pengereman
1.	Kecepatan roda	Roda depan, roda belakang	Roda depan
2.	Gaya lateral	Ada untuk semua roda	Ditiadakan untuk roda depan

3.	Gaya longitudinal	Ada untuk semua roda	Ada untuk semua roda
4.	<i>Slip</i>	Ada untuk semua roda	Tidak ada untuk roda depan

KESIMPULAN

Persamaan sistem dinamika gerak model Becak sederhana dibentuk untuk gerak yang melibatkan proses pengereman. Proses pengereman dianggap penting untuk ditambahkan karena keseluruhan sistem gerak dinamik model Becak sederhana akan menyerupai sistem gerak riilnya jika mengkombinasikan persamaan dinamika gerak dengan dan tanpa proses pengereman. Keseluruhan sistem gerak dinamik model Becak sederhana diberikan oleh persamaan (10) – (12) untuk sistem tanpa pengereman dan persamaan (17) – (19) untuk sistem dengan pengereman. Kedua sistem akan digunakan secara simultan pada proses analisis dan simulasi model Becak sederhana dengan menggunakan MEH/AEH pada proses selanjutnya. Selain itu, karakteristik komponen model Becak sederhana juga ditentukan secara spesifik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada seluruh rekan kerja di laboratorium komputasi, FASILKOM Universitas Indonesia, Ketua jurusan Matematika FMIPA Universitas Andalas, dan STITEKNAS Jambi, atas segala bantuannya dalam penyelesaian paper ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Idris, "Indonesia masuk negara maju atau berkembang? Ini penjelasan WTO", Kompas.com, 2020.
- [2] N. Alfiany, G. Jati, N. Hamid, R. A. Ramadhani, M. W. D. Santika, and W. Jatmiko, "Kinematics and simulation model of autonomous Indonesian "Becak" robot", IEEE Region 10 Symposium (TENSYP), IEEE, 2020.
- [3] N. Alfiany, N. Hamid, G. Jati, M. A. Ma'sum, and W. Jatmiko, "Kinematics and dynamics analysis of an autonomous three-wheeled bicycle modeling",

2019 4th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS), IEEE, 2019.

dynamics", Butterworth-Heinemann, 2012.

- [4] D. V. Hutton, "Fundamentals of Finite Element Analysis", McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2003.
- [5] A. Belhocine, "Numerical simulation of thermoelastic contact problem of braking systems", J. Fail. Anal. and Preven., Springer, 2015.
- [6] S. Koetnuyom, "Temperature analysis of automotive brake discs", J. King Mongkut's Univ. Technol. N Bangkok, King Mongkut University, 2003.
- [7] T. Kamnerdtong, S. Chutima, and A. Siriwanpolkul, "Analysis of temperature distribution on brake disc", In Proceeding of the 19th ME-NETT, 2005.
- [8] K. Sowjanya and S. Suresh, "Structural analysis of disc brake rotor", Int. J. Comput. Trends. Technol (IJCTT), 2013.
- [9] V. C. Reddy, M. G. Gowd, and G. H. Gowd, "Modeling and analysis of FSAE car disc brake using FEM, Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng., 2013.
- [10] P. Ganesh, C. Naresh, S. A. Hussain, "Finite element analysis of normal and vented disc brake rotor", Int. J. Mech. Eng. Rob. Res, 2014.
- [11] T. V. Manjunath and P. M. Suresh, "Structural and thermal analysis of rotor disc of disc brake", Int. J. Innov. Res. Sci., 2013.
- [12] V. Parab, K. Naik, and A. D. Dhale, "Structural and thermal analysis of brake disc", Int. J. Eng. Dev. Res., 2014.
- [13] A. K. Tiwari, P. Yadav, H. S. Yadav, and S. B. Lal, "Finite element analysis of disc brake by ANSYS workbench", Int. J. Res. Eng. Adv. Technol., 2014.
- [14] S. Klug, A. Moia, A. Varhagen, D. Gorger, and S. M. Saveri, "Effectiveness of actuating on rectilinear bicycle braking dynamics", IFAC Papers Online, Elsevier, 2017.
- [15] H. B. Pacejka and I. Besselink, "Tire and vehicle