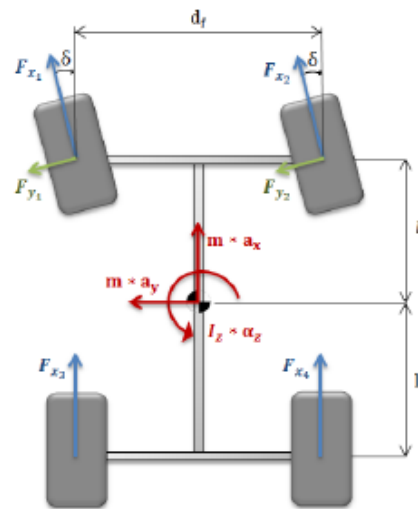


Pengaturan Kemudi yang *Robust* terhadap Ketidakpastian Parameter Internal pada Mobil Otonom

Ryan Aditya, Achmad Jazidie, dan Eka Iskandar
 Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: iskandar@elect-eng.its.ac.id

Abstrak—Ketidakpastian dalam aplikasi kontrol kemudi tidak dapat dihindari. Apabila ada perubahan parameter atau gangguan lain pada sistem, kontroler dapat menjadi tidak stabil. Desain kontroler yang diajukan berupa Linear Quadratic Tracker (LQT) untuk kemudi lateral mobil otonom dengan adanya ketidakpastian internal dari parameter massa, momen inersia, dan konstanta kekakuan menikung, sehingga hasil dari penelitian ini diharapkan kontroler lebih robust terhadap ketidakpastian dan tetap dapat mengikuti input yang diberikan. Kontroler yang diajukan sudah robust terhadap variasi parameter massa dan momen inersia akibat pembobotan serta konstanta kekakuan menikung untuk roda depan dan belakang akibat perubahan tekanan udara dan ketebalan roda. Kontroler yang diajukan juga dapat mengikuti input yang diberikan dengan error kecil dengan adanya ketidakpastian parameter.

Kata Kunci—Mobil Otonom, LQT, *Robust*, Ketidakpastian Parameter.



Gambar 1. Tampak atas resultan gaya dari mobil.

I. PENDAHULUAN

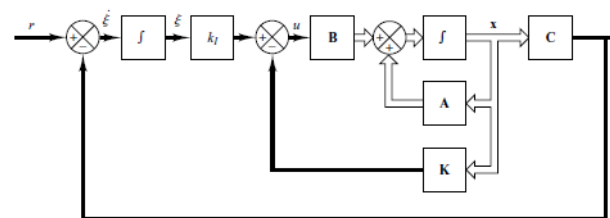
MANUSIA sudah menjadi makhluk hidup yang sering berpindah dari satu tempat ke tempat lainnya, sehingga menumbuhkan kebutuhan bepergian yang dapat dipenuhi melalui penggunaan kendaraan otonom. Kendaraan jenis ini dapat menjadi alat transportasi yang diandalkan dengan keamanan, kenyamanan dan kecepatan yang terjamin. Mereka dapat mengetahui keadaan lingkungan sekitar, seperti keberadaan dan kecepatan objek serta pengguna jalan lain, kondisi jalan seperti tikungan, dan juga rintangan [1].

Kendaraan otonom dapat dibagi menjadi lima tingkat. Pada tingkat pertama, mayoritas komponen masih dikendalikan oleh manusia, tapi beberapa fungsi seperti kemudi dan akselerasi dapat dilakukan secara otomatis. Tingkat kedua, setidaknya ada satu sistem bantu kemudi yang otonom. Namun, pengemudi harus selalu siap untuk kembali mengendalikan kendaraan. Untuk tingkat ketiga, pengemudi masih tetap diperlukan dalam kendaraan dan mengambil kembali kendali jika dibutuhkan. Tingkat keempat kendaraan sudah sepenuhnya otonom namun hanya untuk skenario tertentu. Tingkat tertinggi, tingkat kelima mengarah pada kendaraan yang sudah sepenuhnya otonom dengan kemampuan setara pengemudi manusia untuk semua skenario [2].

Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi kendaraan otonom telah berhasil dikembangkan baik dalam dunia akademik maupun industri. Tantangan dari kendaraan otonom adalah persyaratan untuk beroperasi secara akurat dan kokoh di lingkungan [3]. Beban dari mobil otonom dapat bervariasi karena adanya perubahan jumlah penumpang atau muatan barang yang dibawa. Variasi ini dapat menyebabkan perubahan pada massa, momen inersia dan lokasi pusat

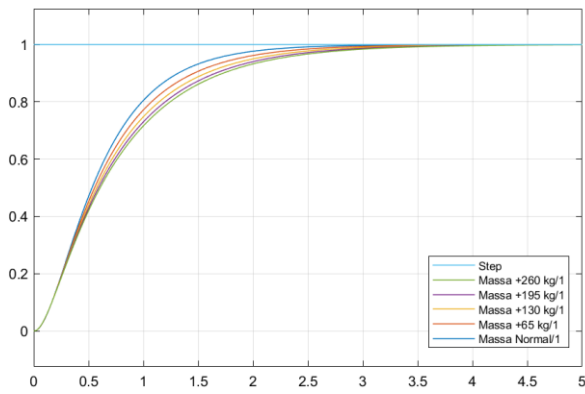
Tabel 1. Parameter mobil

Nama	Simbol	Nilai
Massa mobil	m	608 kg
Percepatan gravitasi	g	9.81 m/s ²
Jarak roda depan terhadap COG	l_f	1.0921 m
Jarak roda belakang terhadap COG	l_r	0.9079 m
Momen inersia mobil	I	1000 kg m ²
Konstanta <i>cornering stiffness</i> roda depan	C_{af}	25668.509 N/rad
Konstanta <i>cornering stiffness</i> roda belakang	C_{ar}	25668.509 N/rad
Radius roda	r_{eff}	0.3 m
Konstanta hambatan gulir	f_r	0.0027
Massa jenis udara	ρ_{air}	1.23 kg/m ³
Konstanta <i>drag</i> udara	C_{drag}	1.0834
Luas depan mobil	A_{front}	2.25 m ²

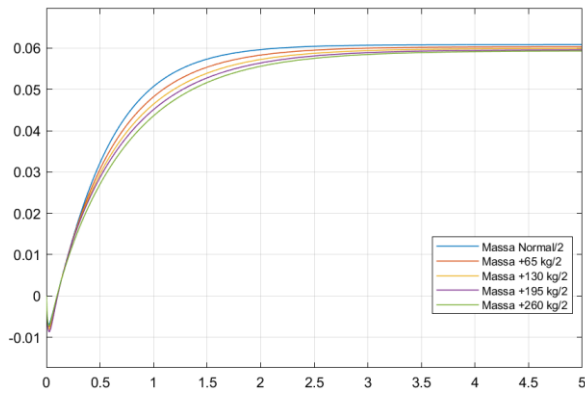


Gambar 2. Diagram blok implementasi kontroler.

gravitasi yang nantinya akan berpengaruh pada dinamika dan kestabilan mobil otonom [4]. Parameter lain yang sulit diestimasi atau diukur secara akurat adalah konstanta kekakuan menikung (*cornering stiffness*). Beberapa faktor yang mempengaruhi variasi parameter ini adalah muatan, tekanan udara pada roda, permukaan jalan, kondisi cuaca, dan lain-lain [5]. Riset sebelumnya mengenai kontrol kemudi, [6] menggunakan kompensator *lead-lag* dengan pendekatan *root*



(a)



(b)

Gambar 3. Output sistem (a) dan input kontrol (b) terhadap variasi massa dan momen inersia.

Tabel 2.

MSE terhadap variasi massa dan momen inersia

Massa (kg)	Momen Inersia (kg/m ²)	MSE (m/s)
648	1000	0.0001
713	1107.085	0.0004
778	1214.01	0.0006
843	1320.935	0.0009
908	1427.86	0.0012

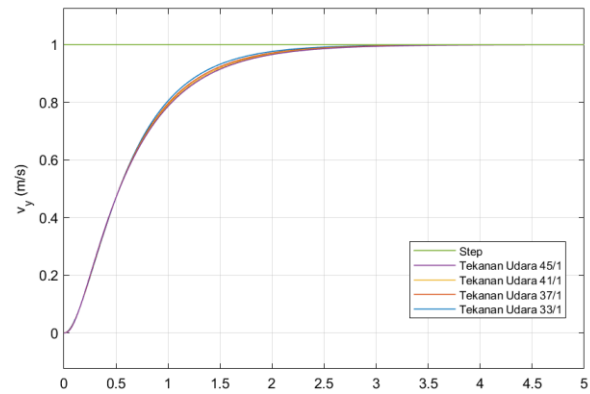
Tabel 3.

MSE terhadap variasi C_{af} karena perbedaan tekanan ban

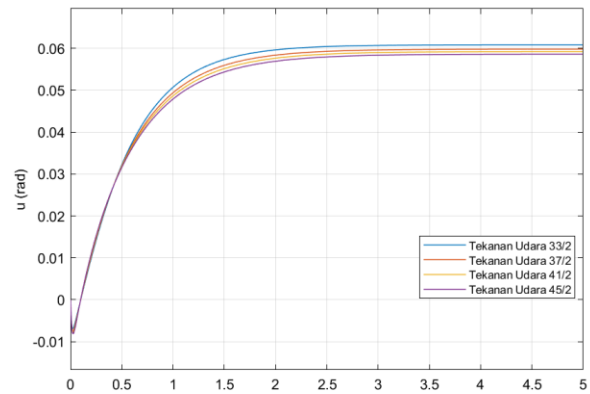
Tekanan Ban (psi)	C _{af} (N/rad)	MSE (m/s)
33	25668.509	0.4854 × 10 ⁻³
37	23871.713	0.6343 × 10 ⁻³
41	22844.973	0.7282 × 10 ⁻³
45	21818.233	0.8285 × 10 ⁻³

locus, [7] menggunakan *cascade control* dengan PID pada *loop* dalam untuk menghaluskan keluaran kontroler Fuzzy terutama pada kecepatan tinggi saat belokan, [8] menggunakan *Nested PID* untuk menyelesaikan masalah *multivariable control*, [9] berhasil menghindari slip pada roda menggunakan kontrol *Full-State Feedback*, namun belum mempertimbangkan ketidakpastian. Dari referensi di atas belum banyak bahasan mengenai kontrol kemudi yang *robust* dengan meminimalkan slip. Maka untuk melanjutkan penelitian kontrol kemudi [10] yang pernah ada sebelumnya akan dikembangkan sehingga menjadi lebih *robust* terhadap ketidakpastian.

Maka pada penelitian ini akan dilakukan desain kontroler *state feedback* untuk kestabilan internal sistem dilanjutkan dengan kontrol *output feedback* dengan bantuan *integrator*



(a)



(b)

Gambar 4. Output sistem (a) dan input kontrol (b) terhadap variasi C_{af} karena perbedaan tekanan roda.

Tabel 4.

MSE terhadap variasi C_{af} karena perbedaan tekanan ban

Tekanan Ban (psi)	C _{af} (N/rad)	MSE (m/s)
33	25668.509	0.7232 × 10 ⁻³
37	23871.713	0.7286 × 10 ⁻³
41	22844.973	0.7317 × 10 ⁻³
45	21818.233	0.7348 × 10 ⁻³

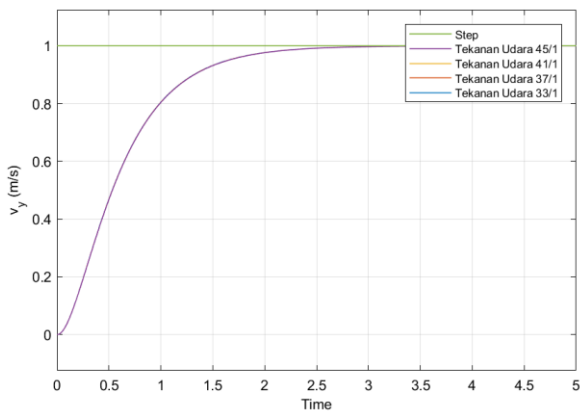
yang dapat menstabilkan mobil otonom akibat adanya beberapa variasi parameter yang telah disebutkan sebelumnya. Adapula beberapa Batasan yang diterapkan yaitu model mobil otonom yang digunakan adalah model linear melalui beberapa asumsi dan kecepatan mobil dianggap konstan. Hasil desain kontroler akan diuji menggunakan aplikasi MATLAB 2021b dan Simulink.

II. METODE PENELITIAN

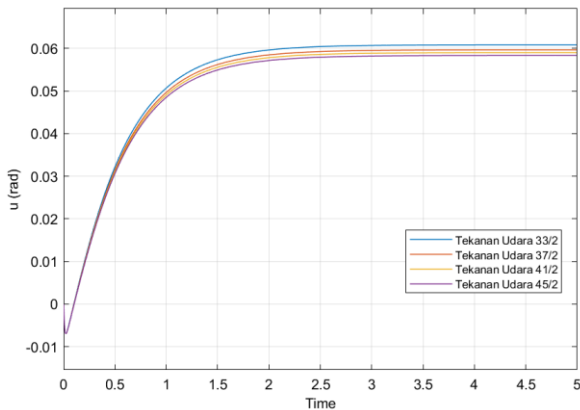
A. Model Dinamik Mobil Otonom

Model dinamik sendiri mendeskripsikan gerak dari mobil terhadap posisi, kecepatan dan percepatan dengan memperhitungkan gaya internal, energi, dan momentum yang ada dalam sistem. Resultan gaya pada mobil tampak atas ditunjukkan pada Gambar 1.

Dalam model ini, gaya dari roda dan massa mobil juga diperhitungkan. Metode paling umum yang digunakan untuk mendapatkan model ini adalah dengan menggunakan persamaan Newton mengenai gerakan [11]. Persamaan dinamik gerak mobil didapatkan melalui kesetimbangan gaya dan torsi pada setiap sumbu. Sumbu longitudinal dilambangkan dengan X, sumbu lateral dilambangkan



(a)



(b)

Gambar 5. Output sistem (a) dan input kontrol (b) terhadap variasi C_{ar} karena perbedaan tekanan roda.

Tabel 5.

MSE terhadap variasi C_{af} karena perbedaan ketebalan ban

Ketebalan Ban	$C_{af}(N/rad)$	MSE(m/s)
100%	25668.509	0.7232×10^{-3}
60%	23871.713	0.2994×10^{-3}
30%	22844.973	0.0841×10^{-3}

dengan Y, dan sumbu yang tegak lurus terhadap jalan dilambangkan dengan Z.

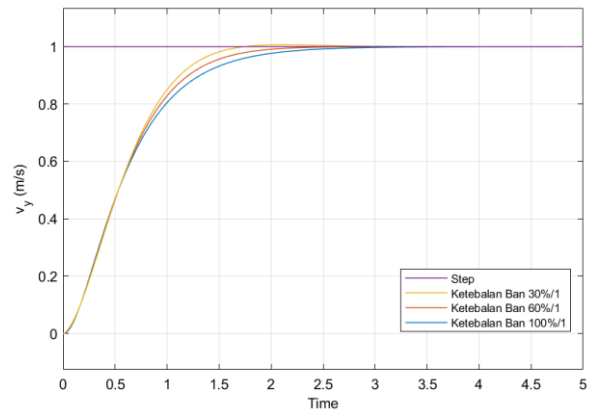
$$\begin{aligned}
 m(\dot{v}_x + v_y\dot{\theta}) &= F_{x1} \cos(\delta) - F_{y1} \sin(\delta) \\
 &+ F_{x2} \cos(\delta) - F_{y2} \sin(\delta) \\
 &+ F_{x3} + F_{x4} - F_{drag} \\
 &- F_{rolling} - F_{slope}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 m(\dot{v}_y + v_x\dot{\theta}) &= F_{x1} \sin(\delta) - F_{y1} \cos(\delta) \\
 &+ F_{x2} \sin(\delta) - F_{y2} \cos(\delta) - F_{tilt}
 \end{aligned} \tag{2}$$

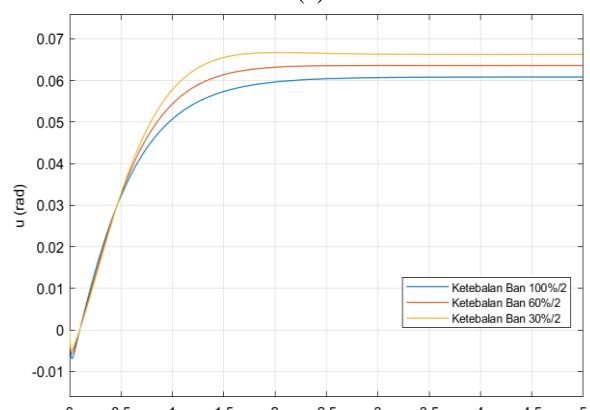
$$\begin{aligned}
 I_z\ddot{\theta} &= l_f(F_{x1} \sin(\delta) + F_{y1} \cos(\delta)) \\
 &+ l_f(F_{x2} \sin(\delta) + F_{y2} \cos(\delta)) \\
 &+ l_r(F_{y3} + F_{y4}).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Dimana:

- δ = Sudut kemudi roda
- m = Massa mobil
- I_z = Momen inersia mobil
- l_f = Jarak roda depan terhadap pusat gravitasi mobil
- l_r = Jarak roda belakang terhadap pusat gravitasi mobil



(a)



(b)

Gambar 6. Output sistem (a) dan input kontrol (b) terhadap variasi C_{af} karena perbedaan tekanan roda.

Tabel 6.

MSE terhadap variasi C_{ar} karena perbedaan ketebalan ban

Ketebalan Ban	$C_{ar}(N/rad)$	MSE(m/s)
100%	25668.509	0.7232×10^{-3}
60%	23871.713	0.7078×10^{-3}
30%	22844.973	0.6925×10^{-3}

- v_x = Kecepatan pada sumbu longitudinal
- v_y = Kecepatan pada sumbu lateral
- θ = Sudut yaw mobil.

Sedangkan untuk gaya aerodinamis F_{drag} sebagai berikut:

$$F_{drag} = 1/2 \rho_{air} C_{drag} A_{front} v_x^2 (sign(v_x)). \tag{4}$$

Dimana:

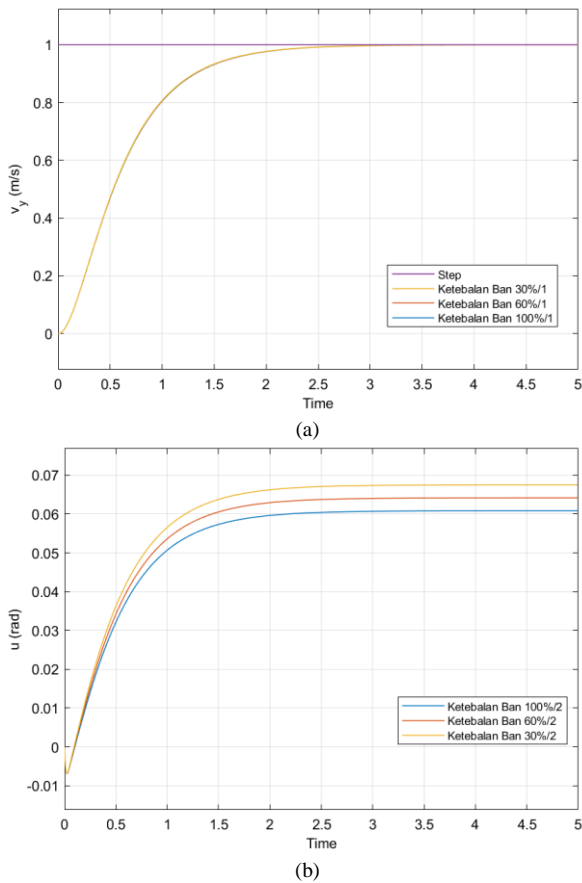
- ρ_{air} = Kepadatan udara (1.2 kg/m^3 pada suhu dan tekanan normal)
- C_{drag} = Koefisien hambatan
- A_{front} = sebagai luas bagian depan kendaraan
- v_x = Kecepatan mobil

Kecepatan aliran yang dalam kasus ini merupakan kecepatan mobil karena kecepatan aliran angin tidak dapat diukur. Untuk gaya hambatan gulir $F_{rolling}$:

$$F_{rolling} = f_r mg \min(1, v_x) (sign(v_x)). \tag{5}$$

Dimana:

- f_r = Koefisien hambatan gulir
- m = Massa mobil
- g = Kecepatan gravitasi



Gambar 7. Output sistem (a) dan input kontrol (b) terhadap variasi C_{ar} karena perbedaan tekanan roda.

Ketika mobil berada pada tanjakan atau turunan ada gaya baru yang muncul karena kemiringan jalan tersebut. Gaya kemiringan jalan pada sumbu lateral F_{tilt} dan pada sumbu longitudinal F_{slope} :

$$F_{slope} = mg \sin(\beta_x) (\text{sign}(v_x)) \tag{6}$$

$$F_{tilt} = mg \sin(\beta_y). \tag{7}$$

Dimana:

β_x = Kemiringan jalan terhadap sumbu lateral

β_y = Sudut kemiringan jalan terhadap sumbu longitudinal

Sedangkan untuk model dinamik pada roda merupakan persamaan gaya sebagai berikut:

$$F_{yf} = C_{af} \left(\delta - \frac{v_y + l_f \dot{\theta}}{v_x} \right), F_{yr} = -C_{ar} \frac{v_y - l_r \dot{\theta}}{v_x} \tag{8}$$

$$F_{xf} = C_{\sigma f} \sigma_{xf}, \quad F_{xr} = C_{\sigma r} \sigma_{xr} \tag{9}$$

Dimana:

C_{af} = Konstanta *cornering stiffness* untuk roda bagian depan

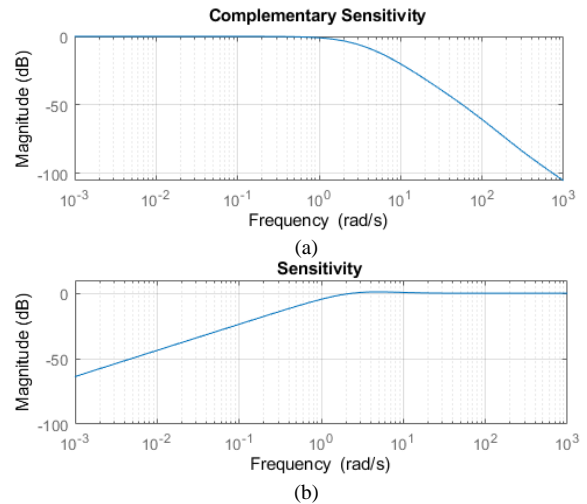
C_{ar} = Konstanta *cornering stiffness* untuk roda bagian belakang

$C_{\sigma f}$ = Konstanta kekakuan roda untuk roda depan

$C_{\sigma r}$ = Konstanta kekakuan roda untuk roda belakang

σ_x = Rasio slip roda

Selanjutnya Persamaan (2.1-2.3) dapat disusun menjadi bentuk persamaan *state space* dengan komponen non linear sebagai berikut:



Gambar 8. Grafik Sensitivitas (a) dan Sensitivitas Pelengkap(b).

$$\begin{aligned}
 M\dot{X} &= AX + BU + W \\
 \dot{X} &= [\dot{v}_x \quad \dot{v}_y \quad \ddot{\theta}]^T \quad X = [v_x \quad v_y \quad \dot{\theta}]^T \\
 U &= \delta \\
 A &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \tag{10} \\
 B &= \begin{bmatrix} 2C_{af} \frac{v_y + l_f \dot{\theta}}{v_x} \\ 2(C_{\sigma f} \sigma_{xf} - C_{af}) \\ 2l_f (C_{\sigma f} \sigma_{xf} + C_{af}) \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} w_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Dimana isi dari matriks A dan W adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= -\frac{\rho_{air} C_{drag} A_{front} v_x}{2} \\
 a_{12} &= -m\dot{\theta} \\
 a_{13} &= -mv_y \\
 a_{22} &= \frac{2C_{af}}{v_x} \\
 a_{23} &= \frac{2C_{af} l_f}{v_x} - mv_x \\
 a_{32} &= -2 \frac{l_f C_{af} + l_r C_{ar}}{v_x} \\
 a_{33} &= 2 \frac{l_r^2 C_{ar} - l_f^2 C_{af}}{v_x} \\
 w_1 &= 2(C_{\sigma r} \sigma_{xr} + C_{\sigma f} \sigma_{xf} - C_{af} \delta \sin(\delta)) - f_r mg.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Untuk melakukan linearisasi model dinamik mobil otonom maka digunakan beberapa asumsi. Karena jalan yang digunakan dalam pengujian adalah datar maka β_x dan β_y diasumsikan bernilai 0 dan mobil diasumsikan selalu bergerak maju, maka $\text{sign}(v_x)$ selalu bernilai 1. Nilai sudut kemudi δ yang diasumsikan kecil atau $\delta \approx 0$, sehingga untuk $\cos(\delta) \approx 1$, $\sin(\delta_i) \approx \delta_i$, dan $\delta_i \sin(\delta_i) \neq 0$. dengan menggunakan asumsi v_x konstan, maka state \dot{v}_x menjadi bernilai 0, karena \dot{v}_x merupakan percepatan, apabila

kecepatan konstan maka tidak terjadi percepatan sehingga bernilai 0. Dengan hilangnya state \dot{v}_x maka matriks W juga menjadi 0 sehingga dapat diabaikan. Sehingga persamaan menjadi persamaan linear dengan 2 derajat kebebasan.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= M^{-1}AX + M^{-1}BU + W \\ \dot{X} &= [\dot{v}_y \quad \ddot{\theta}]^T \quad X = [v_y \quad \dot{\theta}]^T \quad U = \delta \\ U &= \delta \\ A &= \begin{bmatrix} \frac{2C_{af}}{v_x} & \frac{2C_{af}l_f}{v_x} - mv_x \\ -2\frac{l_f C_{af} + l_r C_{ar}}{v_x} & 2\frac{l_r^2 C_{ar} - l_f^2 C_{af}}{v_x} \end{bmatrix} \\ M &= \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_z \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 2(C_{of}\sigma_{xf} - C_{af}) \\ 2l_f(C_{of}\sigma_{xf} + C_{af}) \end{bmatrix} \\ W &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{12}$$

Untuk Parameter mobil yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari [12] yang dapat dilihat pada Tabel 1. Untuk kecepatan konstan (v_x) yang digunakan adalah 60 km/jam atau setara dengan 16.667 m/s, parameter C_{of} dan C_{or} diasumsikan memiliki parameter konstan 30000 N/rad, dan rasio antara slip kecepatan roda dengan mobil (σ_x) diasumsikan bernilai 0.8.

B. Desain Kontroler

Menurut Katsuhiko, et.al (2010), prinsip dasar dari desain sistem servo tipe 1 adalah dengan menambahkan integrator diantara error dengan plant, sesuai pada Gambar 2 [13]. Dengan menyusun Persamaan (13), didapatkan *state space* baru yang mengandung vektor error $e(t)$ dan *input* kontrol sesuai Persamaan (14).

$$\begin{aligned} e(t) &= \hat{A}e + \hat{B}u_e \\ \hat{A} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad e = \begin{bmatrix} x_e(t) \\ \xi_e(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{13}$$

$$u_e(t) = -Kx_e(t) + k_i \xi_e(t) \tag{14}$$

$$\hat{K} = [K \quad \vdots \quad -k_i]. \tag{15}$$

Untuk menentukan nilai gain K digunakan bantuan *cost function* (16) yang dapat ditemukan setelah menyelesaikan persamaan Riccati (17) sebagai berikut,

$$J = \int_0^\infty (e^T Qx + u^T R u_e) dt \tag{16}$$

$$\hat{A}^T P + P \hat{A} - P \hat{B} R^{-1} \hat{B}^T P + Q = 0. \tag{17}$$

Dimana:

R = Matriks $m \times m$

Q = Matriks $n \times n$ yang bernilai positif definit ($Q \geq 0, R > 0$).

Maka *Gain feedback* optimal \hat{K} dirumuskan sebagai berikut,

$$\hat{K} = R^{-1} \hat{B}^T P. \tag{18}$$

Diagram blok untuk kontroler pada Gambar 2 digunakan sebagai dasaran menyusun simulasi pada Simulink. Untuk

penelitian ini akan dibandingkan kombinasi pembobot Q dan R dengan nilai 1 dan 10 menggunakan bantuan fungsi *icare* dari MATLAB. Spesifikasi pemilihan gain adalah error *steady state* dibawah 0.1%, maka didapatkan gain sesuai dengan Q = *diag*(10,1,10) dan R = 10.

$$\hat{K} = [-1.1280 \quad 1.0546 \quad 1] \tag{13}$$

C. Penyusunan Simulasi

Pada penelitian ini, pengujian dilakukan dengan memberikan variasi konstanta kekakuan menikung roda depan (C_{af}), konstanta kekakuan menikung roda belakang (C_{ar}), massa mobil (m) dan momen inersia (I_z) dalam skenario tertentu. Pertama, parameter massa (m) dan momen inersia (I_z) terhadap penambahan beban penumpang pada mobil, untuk massa (m) penambahan 1 sampai 4 orang secara berurutan +65 kg, +130 kg, +195 kg, + 260 kg dan untuk momen inersia (I_z) secara berurutan juga +107.085 kg/m², +214.01 kg/m², +320.935 kg/m², +427.86 kg/m². Selanjutnya, parameter C_{af} dan C_{ar} masing-masing terhadap perubahan tekanan udara pada roda dengan kondisi roda 100% dengan pengurangan nilai saat tekanan udara roda 33, 37, 41, 45 psi secara berurutan -0%, -7%, -11%, -15%. Terakhir, parameter C_{af} dan C_{ar} masing-masing terhadap perubahan akibat ketebalan pada roda dengan tekanan udara 40 psi dengan penambahan nilai saat ketebalan roda 100%, 60%, 30% secara berurutan 0%, +20%, +40%. Sistem akan diberikan input step dengan nilai 1 dan akan dihitung *mean squared error* (MSE) saat *steady state*. Sistem juga akan dilakukan uji sensitivitas dan sensitivitas pelengkap.

III. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Untuk pengujian perubahan beban pada mobil berdasarkan Gambar 3(a), sistem masih tetap stabil terhadap penambahan massa dan momen inersia. Dari 4 percobaan tidak terjadi banyak perbedaan yang terjadi saat *rise time*. Waktu *steady state* bernilai sekitar 1.7 detik.

Variasi parameter ini menyebabkan *output* sistem lebih lambat mencapai *input* yang diinginkan. *Input* kontrol yang diberikan berdasarkan Gambar 3(b), berkurang untuk setiap penambahan massa yang diberikan. Nilai MSE saat *steady state* berdasarkan Tabel 2 bertambah seiring bertambahnya massa dan momen inersia.

Selanjutnya untuk berdasarkan Gambar 4(a), sistem juga masih tetap stabil terhadap pengurangan nilai C_{af} . Dari 4 percobaan sistem mencapai waktu *steady state* pada 1.4 detik. Variasi parameter ini menghasilkan *output steady state* yang tidak berbeda jauh antar percobaan. Sedangkan *input* kontrol yang diberikan berdasarkan Gambar 4(b) berkurang jika semakin tinggi tekanan udara yang ada pada roda. Berdasarkan Tabel 3, perbedaan error yang dihasilkan antar percobaan kecil dengan nilai MSE bertambah seiring bertambahnya nilai C_{af} akibat penambahan tekanan udara roda.

Untuk parameter C_{ar} , *output* sistem pada Gambar 4-5 keempat percobaan saling berhimpit atau serupa. Sedangkan untuk *input* kontrolnya semakin kecil seiring bertambahnya tekanan udara pada roda belakang. Berdasarkan Tabel 4, error

yang dihasilkan juga tidak berbeda jauh antar percobaan, dengan eror MSE bertambah seiring bertambahnya tekanan udara ban. Terakhir untuk pengaruh ketebalan roda. Dapat dilihat dari Gambar 6(a) untuk ketiga percobaan *output* ketika *steady state* tidak berbeda jauh. Namun semakin tebal kondisi ban semakin lambat *output* yang dihasilkan. Waktu yang diperlukan untuk mencapai *steady state* bernilai sekitar 1.3 detik. Dari Gambar 6(b), kontrol yang diberikan meningkat seiring berkurangnya ketebalan pada ban depan. Berdasarkan Tabel 5, nilai eror berkurang seiring berkurangnya ketebalan ban.

Untuk parameter C_{ar} , *output* sistem pada Gambar 7 tidak jauh berbeda untuk ketiga percobaan. Sedangkan untuk *input* kontrol pada Gambar 8 memiliki *output* yang serupa pada percobaan parameter C_{af} . Namun nilai eror pada Tabel 6 mengalami penurunan seiring berkurangnya ketebalan ban, walaupun tidak terlalu berbeda jauh.

Dari Gambar 8(a), sistem menolak *input* diatas frekuensi 1 rad/s dan menerima *input* dibawah frekuensi 1 rad/s. Hal ini menandakan sistem cukup *robust* terhadap gangguan *noise* atau ketidakpastian terutama pada frekuensi tinggi. Selanjutnya untuk grafik sensitivitas dari Gambar 8(b), terlihat ada sedikit pucuk yang bernilai 1.1 dB. Hal ini menunjukkan sistem sedikit rentan terhadap gangguan *disturbance* dengan frekuensi sekitar 2.5 sampai 25 rad/s. Selain itu sistem menolak *input disturbance* pada frekuensi rendah.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil setelah melakukan penelitian adalah kontroler sudah *robust* terhadap variasi parameter massa dan momen inersia walaupun terjadi pergeseran nilai *output* waktu *steady state* dengan MSE 0.0012 m/s. Kontroler juga sudah *robust* terhadap variasi parameter C_{af} dan C_{ar} untuk perubahan tekanan udara pada roda dengan MSE terbesar untuk parameter C_{af} dan C_{ar} adalah 0.8285×10^{-3} m/s dan 0.7348×10^{-3} m/s secara berurutan. Terakhir untuk variasi parameter C_{af} dan C_{ar} untuk perubahan ketebalan roda kontroler masih tetap *robust* dengan MSE 0.7232×10^{-3} m/s untuk variasi C_{af} dan 0.7232×10^{-3} m/s untuk variasi C_{ar} . Adapula saran untuk menunjang penelitian yang serupa kedepannya adalah mempertimbangkan ketidakpastian dari faktor jalan yang

dilalui, melakukan pengujian terhadap gangguan pengukuran., kontrol kemudi yang lebih *robust* untuk kecepatan rendah dibawah 40 km/jam.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Arifin, Bustanul and Suprpto, Bhakti Yudo and Prasetyowati, Sri Arttini Dwi and Nawawi, "The Lateral Control Of Autonomous Vehicles: A Review," in 2019 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS), 2019, pp. 277--282.
- [2] C. S. Yaqoob, Ibrar and Khan, Latif U and Kazmi, SM Ahsan and Imran, Muhammad and Guizani, Nadra and Hong, "Autonomous driving cars in smart cities: Recent advances, requirements, and challenges." IEEE Network, vol. 34, no. 1, pp. 174--181, 2019.
- [3] K. B. Singh, M. A. Arat, and S. Taheri, "An intelligent tire based tire-road friction estimation technique and adaptive wheel slip controller for antilock brake system," Journal of Dynamic Systems Measurement Control. Transactions of the ASME, vol. 135, no. 3, 2013, doi: 10.1115/1.4007704.
- [4] G. Du, Haiping and Zhang, Nong and Dong, "Stabilizing vehicle lateral dynamics with considerations of parameter uncertainties and control saturation through robust yaw control," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, no. 5, pp. 2593--2597, 2010.
- [5] M. Sadeghi Kati, H. K roglu, and J. Fredriksson, "Robust lateral control of long-combination vehicles under moments of inertia and tyre cornering stiffness uncertainties," Vehicle System Dynamics, vol. 57, no. 12, pp. 1847--1873, 2019, doi: 10.1080/00423114.2018.1552363.
- [6] A. Herpin, John and Fekih, Afef and Golconda, Suresh and Lakhota, "Steering control of the autonomous vehicle: Cajunbot," Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, vol. 4, no. 12, pp. 1134--1142, 2007.
- [7] E. Perez, Joshue and Milanes, Vicente and Onieva, "Cascade architecture for lateral control in autonomous vehicles," IEEE Transactions Intelligent Transportations Systems, vol. 12, no. 1, pp. 73--82, 2011.
- [8] M. Marino, Riccardo and Scalzi, Stefano and Netto, "Nested PID steering control for lane keeping in autonomous vehicles," Control Engineering Practice, vol. 19, no. 12, pp. 1459--1467, 2011.
- [9] F. Chen, Changfang and Jia, Yingmin and Du, Junping and Yu, "Lane Keeping Control for Autonomous 4WS4WD Vehicles Subject to Wheel Slip Constraint," in 2012 American Control Conference (ACC), 2012, pp. 6515--6520.
- [10] A. Amiruddin, Brilian Putra and Kadir, Rusdhianto Effendi Abdul and Santoso, "Pengaturan kemudi kendaraan otonom Four Wheel Steer dan Four Wheel Drive (4WS4WD) menggunakan model predictive control," Jurnal Teknik ITS, vol. 10, no. 1, pp. E1--E6, 2021.
- [11] Z. A. Amer, Noor Hafizah and Zamzuri, Hairi and Hudha, Khisbullah and Kadir, "Modelling and control strategies in path tracking control for autonomous ground vehicles: a review of state of the art and challenges," Journal of Intelligent & Robot Systems, vol. 86, no. 2, pp. 225--254, 2017.
- [12] G. C. Pereira, "Model Predictive Control For Autonomous Driving Of Over-Actuated Research Vehicle," KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2016.
- [13] K. Ogata and others, "Modern Control Engineering," Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, vol. 5, 2010.