

Pengaturan Kemudi Kendaraan Otonom *Four Wheel Steer* dan *Four Wheel Drive (4WS4WD)* Menggunakan *Model Predictive Control*

Brilian Putra Amiruddin, Rusdhianto Effendi Abdul Kadir, dan Ari Santoso
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: ditto@ee.its.ac.id

Abstrak—Riset dan perkembangan kendaraan otonom yang semakin masif memberikan tantangan baru pada permasalahan pengaturan kendaraan otonom itu sendiri. Salah satu model kendaraan yang sering digunakan karena terkenal akan kemampuan manuvernya adalah model 4WS4WD. Salah satu permasalahan pengaturan yang berpengaruh signifikan pada keotonoman kendaraan adalah sistem pengaturan kemudinya. Pengaturan kemudi ini memegang peranan penting dalam beberapa skenario misalnya perubahan lajur dan pelacakan jalur. Pada penelitian ini, algoritma kontrol *Model Predictive Control (MPC)* dirancang untuk mengatur kemudi dari kendaraan otonom model 4WS4WD. Dari hasil percobaan dengan beberapa skenario diperoleh bahwa kontroler kemudi yang dirancang memiliki nilai IAE dan RMSE terendah ketika $N_p = 6$ dan $N_c = 5$ dengan rata-rata nilai 706.32 dan 0.0296, masing-masing.

Kata Kunci—Kendaraan Otonom, Model 4WS4WD, *Model Predictive Control*, Pengaturan Kemudi.

I. PENDAHULUAN

PADA abad ke-20 ini kendaraan otonom yang digadang-gadang menjadi solusi transportasi di masa depan ini sering menjadi topik pembicaraan dari segala elemen masyarakat mulai dari masyarakat awam hingga cendekiawan, riset mengenai kendaraan otonom khususnya kendaraan otonom ini semakin gencar diadakan, beberapa contoh perusahaan yang melakukan riset dan pengembangan kendaraan otonom antara lain Waymo yang diinisiasi oleh raksasa teknologi Amerika Serikat Google, General Motors, Tesla, Ford, dan BMW [1].

Pada dasarnya, menurut taksonomi oleh SAE (Society of Automotive Engineers) J3016, level keotonoman dari kendaraan dibagi menjadi 6 berdasarkan dari tingkat campur tangan manusia dalam pengoperasian kendaraannya, semakin tinggi level maka semakin rendah campur tangan manusia terhadap pengoperasian kendaraannya, sebuah kendaraan dikategorikan sebagai kendaraan otonom penuh (*full driving automation*) jika kendaraan itu termasuk pada level 5 atau level tertinggi dari taksonomi oleh SAE, pada level tertinggi sebuah kendaraan sudah tidak memerlukan sopir lagi dalam pengoperasiannya, semua tugas yang biasanya dilakukan oleh sopir kendaraan digantikan oleh ADS (*Automated Driving Systems*) misalnya untuk melakukan DDT (*Dynamic Driving Task*) seperti mengatur kecepatan kendaraan atau sudut kemudi kendaraan [2].

Pada pengendalian kemudi kendaraan otonom model 4WS4WD, sebuah kontroler harus mampu untuk menentukan berapa sudut kemudi kendaraan yang tepat agar kendaraan tetap berada pada lintasan yang diinginkan, pada

kenyataannya di dunia ini semua tipe jalan atau lintasan yang dilalui kendaraan selalu dinamis dan berubah terhadap waktu, dari lintasan yang dinamis tersebut harusnya kontroler yang didesain dapat memprediksi apa yang akan terjadi di masa depan atau memiliki kemampuan *predictive* agar dapat memperkirakan berapa sudut kemudi yang sesuai sehingga performa *path tracking* kendaraan menjadi lebih handal. Ditambah lagi dengan batasan fisik yang dimiliki oleh sistem harus juga diperhitungkan oleh kontroler.

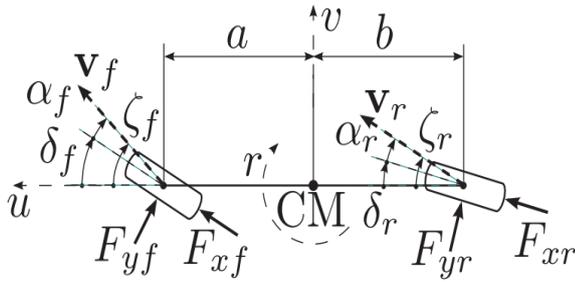
Terhadap permasalahan ini pendekatan menggunakan metode kontrol konvensional seperti kontroler PID kurang cocok untuk digunakan karena kontroler PID hanya dapat dipakai untuk mengetahui keadaan waktu saat ini dan kontroler PID tidak memiliki kemampuan untuk memprediksi keluaran sistem di masa depan [3], oleh karena itu dibutuhkan pendekatan kontroler yang dapat memprediksi keluaran di masa depan sehingga kendali kemudi pada, salah satunya adalah metode kontrol *Model Predictive Control (MPC)* [4]. Pada penelitian ini dilakukan perancangan kontroler MPC untuk mengendalikan kemudi dari kendaraan otonom 4WS4WD.

Setelah dilakukan perancangan dan simulasi kemudian hasilnya dievaluasi dengan beberapa parameter uji untuk menentukan performa dari kontroler yang telah didesain. Menurut sepengetahuan pengarang belum pernah ditemukan literatur yang spesifik membahas mengenai pengaturan kemudi kendaraan otonom 4WS4WD dengan algoritma kontrol MPC. Bagian selanjutnya dari karya tulis ini ditata dengan tata bagian sebagai berikut, Bagian II membahas mengenai dasar teori dan metode dari penelitian ini meliputi pemodelan kendaraan otonom 4WS4WD, dan teori dasar mengenai MPC serta langkah-langkah perancangannya. Selanjutnya pada Bagian III dijelaskan mengenai hasil simulasi yang telah diperoleh serta analisis dari data tersebut. Terakhir pada Bagian IV, dipaparkan kesimpulan dari penelitian dan saran untuk pengembangan penelitian yang sudah dilakukan di masa depan.

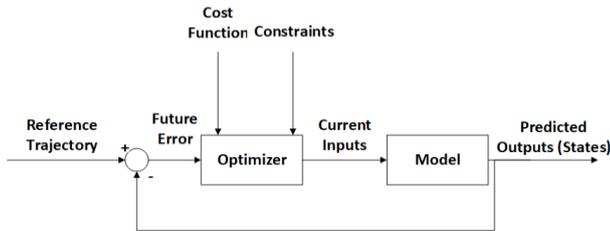
II. METODE PENELITIAN

A. Model Kendaraan Otonom 4WS4WD

Pada tiga dekade terakhir, riset pada dunia industri maupun akademis dalam mengembangkan teknologi kendaraan otonom semakin meningkat. Perkembangan ini diikuti oleh kemajuan teknologi yang semakin pesat dan lanjut pada dunia teknologi komputasi [5]. Model dinamika kendaraan pun juga ikut berkembang dari yang dahulu hanya menggunakan dua kemudi dan dua penggerak atau biasa disebut dengan



Gambar 1. Model kendaraan otonom 4WS4WD.



Gambar 2. Struktur dasar model predictive control (MPC).

kinematika sepeda atau *bicycle* kinematics [6], empat penggerak dan dua kemudi (4WD) [7], dan yang lebih kompleks adalah kendaraan dengan model empat penggerak dan empat kemudi (4WS4WD) [8].

Model kendaraan otonom 4WS4WD sering digunakan untuk kendaraan yang biasanya digunakan pada medan dan lingkungan yang kompleks karena model kendaraan ini memiliki tingkat manuver yang lebih tinggi daripada model lainnya. Pada dasarnya model dinamika dari kendaraan otonom 4WS4WD ini terdiri dari lima subsistem yaitu rangka utama kendaraan dan empat kemudi dan penggerak yang independen. Kendaraan otonom 4WS4WD dapat direpresentasikan dalam beberapa DOF (*degree-of-freedom*) atau derajat kebebasan yaitu 6 DOF (model Pacejka), 3DOF, dan 2 DOF. Pada penelitian ini digunakan model kendaraan 2 DOF yang merupakan penurunan dari model 6 DOF dan 3 DOF yang dipaparkan sebagai berikut [8].

Model dari kendaraan otonom 4WS4WD dengan 3 DOF dapat direpresentasikan dalam dinamika nonlinier pada Persamaan (1)-(5) berikut,

$$m(\dot{u} - rv) = F_{xf} \cos(\delta_f) - F_{yf} \sin(\delta_f) + F_{xr} \cos(\delta_r) - F_{yr} \sin(\delta_r) - C_D A_D u^2 \quad (1)$$

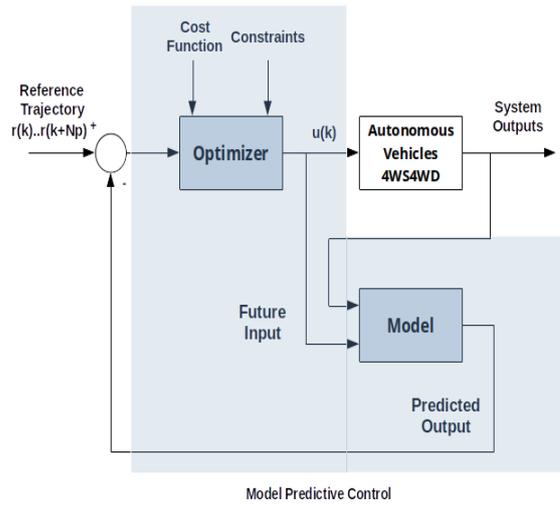
$$m(\dot{v} + ru) = F_{xf} \sin(\delta_f) + F_{yf} \cos(\delta_f) + F_{xr} \sin(\delta_r) + F_{yr} \cos(\delta_r) \quad (2)$$

$$I_z \dot{r} = aF_{xf} \sin(\delta_f) + aF_{yf} \cos(\delta_f) - bF_{xr} \sin(\delta_r) - bF_{yr} \cos(\delta_r) \quad (3)$$

Dimana,

$$F_{yf} = -C_{\alpha f}(\epsilon_f - \delta_f), \quad F_{yr} = -C_{\alpha r}(\epsilon_r - \delta_r) \quad (4)$$

Dengan $C_{\alpha f}$ dan $C_{\alpha r}$ adalah kemiringan dari garis yang dicocokkan dengan bagian linier dari gaya lateral terhadap kurva sudut slip ($-5^\circ < \alpha < 5^\circ$) diturunkan dari model Pacejka untuk nilai gaya nominal roda ($\frac{1}{4}$ dari berat kendaraan) [8].



Gambar 3. Diagram blok pengaturan kemudi kendaraan otonom 4WS4WD.

Sudut dari vector kecepatan tengah roda pada model 3DOF didefinisikan pada Persamaan (5).

$$\epsilon_f = \tan^{-1}\left(\frac{v+ra}{u}\right), \quad \epsilon_r = \tan^{-1}\left(\frac{v-rb}{u}\right), \quad u \neq 0 \quad (5)$$

Serta diasumsikan juga bahwa porsi γ dari total gaya dorong F_x yang diberikan pada as roda depan dan sisa gaya dorong diberikan ke as roda belakang, dengan ($0 \leq \gamma \leq 1$), sehingga gaya untuk roda dapat dituliskan pada Persamaan (6).

$$F_{xf} = \gamma F_x, \quad F_{xr} = (1 - \gamma) F_x \quad (6)$$

Nilai $\gamma = 1$ untuk kendaraan dengan penggerak roda depan (*front-wheel-drive*) serta $\gamma = 0$ untuk kendaraan dengan penggerak roda belakang (*rear-wheel-drive*). Pada kasus *fourwheel drive* atau empat penggerak maka pemilihan parameter γ dipilih $\gamma = 0.5$ agar gaya yang diberikan merata pada roda depan dan belakang (sistem dianggap beroperasi pada keadaan *all-wheel-drive*). Model 3DOF yang diperoleh akan disederhanakan dengan mengasumsikan bahwa nilai sudut kemudi yang efektif ($\epsilon_i, i = r, f$) kecil, sehingga nilai dari $\tan(\epsilon_i) \approx \epsilon_i$. Sebagai tambahan, sudut kemudi juga diasumsikan kecil ($\delta_i, i = r, f$). Sehingga diperoleh $\cos(\delta_i) \approx 1$, $\sin(\delta_i) \approx \delta_i$, dan $\delta_i \sin(\delta_i) \neq 0$. Dari asumsi yang sudah diberikan maka dengan mensubstitusikan Persamaan (5) dan (6) ke (3), maka diperoleh Persamaan (7),

$$M[\dot{u} \quad \dot{v} \quad \dot{r}]^T + A_1[u \quad v \quad r]^T + B_1[F_x \quad \delta_f \quad \delta_r]^T + W_1 = 0 \quad (7)$$

Dengan rincian seperti pada Persamaan (8)-(11),

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_D A_D u & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_{\alpha f} + C_{\alpha r}}{u} & mu + \frac{C_{\alpha f} a - C_{\alpha r} b}{u} \\ 0 & \frac{C_{\alpha f} a - C_{\alpha r} b}{u} & \frac{C_{\alpha f} a^2 + C_{\alpha r} b^2}{u} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} -1 & C_{af} \left(\frac{v+ar}{u} \right) & C_{ar} \left(\frac{v-br}{u} \right) \\ 0 & -C_{af} & -C_{ar} \\ 0 & -aC_{af} & bC_{ar} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} C_{af}\delta_f \sin(\delta_f) + C_{ar}\delta_r \sin(\delta_r) \\ -\gamma F_x \delta_f - (1-\gamma)F_x \delta_r \\ -a\gamma F_x \delta_f + b(1-\gamma)F_x \delta_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

Sistem kendaraan otonom 4WS4WD dengan 3 DOF ini memiliki input sistem, dan variabel *state* sistem seperti pada Persamaan (12) dan (13),

$$U = [F_x \quad \delta_f \quad \delta_r]^T \quad (12)$$

$$X = [u \quad v \quad r]^T \quad (13)$$

Dimana *u*, *v*, dan *r* masing-masing merupakan kecepatan longitudinal (m/s), lateral (m/s), dan sudut (rad/s) dari mobil. Lalu, dengan mengubah ruas dari Persamaan (7) maka dapat diperoleh representasi sistem yang baru seperti pada (14),

$$\begin{aligned} \dot{X} &= (-M^{-1}A_1)X + (-M^{-1}B_1)U + (-M^{-1}W_1) \\ &= AX + BU + W \end{aligned} \quad (14)$$

Gambar 1 merepresentasikan model kendaraan otonom 4WS4WD.

Selanjutnya dengan mengasumsikan bahwa nilai sudut kemudi kecil dan kecepatan longitudinal *u* konstan. Maka, dari asumsi tersebut maka representasi *state u* yang mengandung persamaan nonlinier dapat dihilangkan. Serta parameter *W*₁ pada (14) juga dihilangkan dari persamaan *state* sistem. Diperoleh penurunan model matematika sistem untuk model 2 DOF pada Persamaan (15)-(20),

$$M_{2dof}\dot{X}_{2dof} + A_{1(2dof)}X_{2dof} + B_{1(2dof)}U_{2dof} = 0 \quad (15)$$

$$M_{2dof} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$A_{1(2dof)} = \begin{bmatrix} \frac{C_{af}+C_{ar}}{u} & mu + \frac{C_{af}a-C_{ar}b}{u} \\ \frac{C_{af}a-C_{ar}b}{u} & \frac{C_{af}a^2+C_{ar}b^2}{u} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$B_{1(2dof)} = \begin{bmatrix} -C_{af} & -C_{ar} \\ -aC_{af} & bC_{ar} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$U_{2dof} = [\delta_f \quad \delta_r]^T \quad (19)$$

$$X_{2dof} = [v \quad r] \quad (20)$$

Sehingga diperoleh persamaan sistem yang baru serta linier pada (21),

$$\begin{aligned} \dot{X}_{2dof} &= (-M_{2dof}^{-1}A_{1(2dof)})X_{2dof} \\ &\quad + (-M_{2dof}^{-1}B_{1(2dof)})U_{2dof} \\ &= A_{2dof}X_{2dof} + B_{2dof}U_{2dof} \end{aligned} \quad (21)$$

B. Pengaturan Kemudi

Perkembangan tren di industri otomotif yang sejalan dengan perkembangan perangkat elektronika, komputer, dan pengendalian dalam hal fungsionalitas dan kerja sistem secara keseluruhan berdampak pada perkembangan sistem keselamatan kendaraan. Dalam sistem pengereman dan penambahan kecepatan, sistem pengendalian kemudi digunakan untuk menambah kestabilan lateral kendaraan.

Pengendalian otomatis dari kendaraan dapat dibagi menjadi dua tugas utama yaitu *path tracking* dan tugas penstabilan sudut yaw (*lane keeping assist*), yang pertama dapat diperoleh melalui sudut kemudi roda depan, dan yang kedua melalui sudut kemudi roda belakang [9].

Pengaturan kemudi ini juga sering disebut dengan *lateral control system* dimana tujuan dari *lateral control* ini adalah mengendalikan kecepatan lateral (*v*) atau kecepatan yang tegak lurus dengan sudut *heading* kendaraan. *Lateral control* dapat membantu dan menggerakkan kendaraan secara aman ketika sedang perubahan lajur atau memberikan arahan ketika kendaraan akan diparkir. Beberapa fungsi utama dari *lateral control system* adalah *lane following*, manuver perubahan lajur (*lane change maneuver*), dan *collision avoidance*.

C. Model Predictive Control

Model Predictive Control (MPC) adalah salah satu jenis algoritma kontrol yang berbasiskan model dan aplikasi optimasi performa secara *online* [10]. Setelah adanya pengembangan yang cukup lama MPC sekarang memiliki dasar ilmu teori dan praktik yang luas pada komunitas akademis [11]. Pada akhir-akhir ini, dapat diketahui bahwa bidang pengaplikasian MPC untuk menyelesaikan masalah optimasi bersyarat semakin luas, diantaranya meliputi bidang kesehatan, energi, aeronautika dan dirgantara, dan sebagainya. MPC memiliki tiga elemen utama yaitu model prediksi, fungsi tujuan atau kendala, dan metode untuk mendapatkan sinyal kontrol.

Ada beberapa macam algoritma dari MPC misalnya *Dynamic Matrix Control* (DMC), *Model Algorithmic Control* (MAC), *Generalized Predictive Control* (GPC), *Predictive Functional Control* (PFC), *Extended Prediction Self Adaptive Control* (EPSAC), dan *Extended Horizon Predictive Control* (EHAC) masing-masing algoritma yang sudah disebutkan memiliki kegunaan tergantung pada sistem yang akan dikendalikan [12].

Beberapa kelebihan utama MPC dalam mendesain sebuah sistem pengaturan diantaranya MPC dapat menyertakan batasan fisik dalam perumusan masalah pengaturan dan mengikutsertakan batasan tersebut pada algoritma optimisasi, selain itu kemudahan dalam pekonfigurasi ulang dan pengadaptasian terhadap perubahan dalam sistem yang dikontrol juga merupakan salah satu kelebihan dari MPC [13]. Namun, MPC ini juga memiliki beberapa kekurangan yaitu membutuhkan waktu yang lebih lama dalam komputasi dibandingkan dengan jenis algoritma kontrol yang lainnya [14], hal ini dikarenakan komputasi algoritma optimasi pada MPC dilakukan pada horizon waktu yang sudah ditentukan. MPC juga memberikan beban komputasi yang cukup besar pada komputer [15].

Melihat dari sisi konsep MPC, MPC akan menghitung sebuah nilai yang akan digunakan sebagai masukan (*input*) sistem sebagai sebuah solusi dari permasalahan optimasi. MPC akan memprediksi keluaran sistem selanjutnya dalam rentang horizon waktu yang sudah ditentukan serta menggunakan masukan dan keluaran sebelumnya dari sistem. Setelah itu, perhitungan sinyal kontrol yang berada pada rentang horizon waktu dan optimasi akan dilakukan [9]. Akurasi prediksi dari kontroler MPC sendiri bergantung pada akurasi dari model *plant* atau sistem [16]. MPC akan mengkalkulasi sinyal kontrol optimal dari setiap input yang

Tabel 1.
Parameter Model Kendaraan Otonom untuk Simulasi

Parameter Sistem dan Nomenklatur	Nilai Parameter
Massa (Sopir + Mobil) (m)	917 kg
Momen Inersia pada Sumbu Z (I_z)	1128 kg.m ²
Jarak Roda Depan ke Pusat Massa (a)	0.91 m
Jarak Roda Belakang ke Pusat Massa (b)	1.64 m
C_{af}	57296 N/rad
C_{ar}	52712 N/rad
Konstanta Persebaran Gaya (γ)	0.5
Panjang mobil	3.427 m
Lebar mobil	1.656 m
Kecepatan Longitudinal Maksimal (u)	42.7 m/s
Sudut Kemudi Mobil (δ_f, δ_r)	$[-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}]$ rad

juga memperhatikan batasan atau *constraint*. Gambar 2 menunjukkan struktur dasar dari algoritma MPC. Respon dari sinyal kontrol selanjutnya akan dikomputasi sebagai permasalahan yang akan diselesaikan oleh horizon *open loop* yang ditentukan pada elemen pertama dari respons sinyal kontrol optimal yang akan digunakan sebagai masukan pada sinyal input sistem selanjutnya, sementara itu elemen lainnya tidak akan digunakan.

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Desain Kontroler

Gambar 3 menunjukkan diagram blok dari pengaturan kemudi dengan MPC yang dirancang. Terlihat bahwa kontroler MPC melakukan *previewing* sinyal referensi dengan melakukan optimasi pada sinyal referensi dari *time step* k hingga $k + N_p$. MPC juga menghitung *constraints* dari sistem untuk diikuti pada proses optimasi dengan menggunakan metode pemrograman kuadratik (*quadratic programming*). Lebih lanjut, model sistem yang digunakan dalam prediksi merupakan model sistem yang sudah terdiskritisasi menggunakan waktu sampling sebesar 0.004. Fungsi tujuan berupa fungsi kuadratik yang diselesaikan dengan metode optimasi pemrograman kuadratik atau *quadratic programming* (QP) pada kontroler MPC yang dirancang ditunjukkan pada Persamaan (22),

$$J = \min_{U_{k \dots U_{k+N_c}}} \sum_{j=0}^{N_p} e_Y(k+j)^T Q e_Y(k+j) + \sum_{j=0}^{N_c} \Delta U(k+j)^T R \Delta U(k+j) \quad (22)$$

s. t.

$$X(k+j+1) = AX(k+j) + BU(k+j)$$

$$Y(k+j) = CX(k+j)$$

$$e_Y(k+j) = Y_{k+j} - ref_{k+j}$$

$$\Delta U(k+j) = U_{k+j+1} - U_{k+j}$$

$$U_{min} \leq U \leq U_{max}, Y_{min} \leq Y \leq Y_{max}$$

Dimana Q merupakan bobot keluaran dan R merupakan bobot sinyal kontrol. Setelah pemasangan sinyal kontrol $U(k) \dots U(k + N_c)$ diperoleh dari hasil optimasi. Kemudian, sinyal input kontrol yang diberikan ke sistem kendaraan otonom 4WS4WD pada kasus ini hanya pada *time step* k saja sedangkan lainnya tidak digunakan. Namun, untuk

input ke model yang dipakai untuk melakukan prediksi, sinyal input kontrol dari *time step* $U(k)$ hingga $U(k + N_c)$ digunakan atau dapat dikatakan sinyal input kontrol digunakan seluruhnya.

Di sini, kontroler MPC menerima dua masukan yaitu sinyal referensi dan keluaran dari model atau sistem. Pada kontroler MPC yang didesain diasumsikan bahwa semua variabel *state* sistem dapat terukur oleh sistem. Selain itu, karena *state* sistem merupakan kecepatan dan bukan posisi maka sinyal referensi akan diberikan turunan setiap waktu untuk mengonversikan referensi berupa posisi menjadi berupa laju perubahan atau kecepatan.

Selebihnya, karena keluaran model sistem yang ada masih dalam bentuk kecepatan, integrator harus ditambahkan setelah keluaran sistem untuk memperoleh posisi global dari kendaraan otonom. Selanjutnya, untuk memperoleh kecepatan global dari kendaraan otonom karena keluaran sistem masih dalam koordinat lokal maka harus dilakukan transformasi terhadap koordinat global terlebih dahulu dengan menggunakan matriks rotasi seperti pada Persamaan (23)-(24) berikut,

$$R_{global}^{local} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} X_{global} \\ Y_{global} \\ \theta_{global} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{local} \\ Y_{local} \\ \theta_{local} \end{bmatrix} \quad (24)$$

B. Alur Simulasi dan Evaluasi Performa

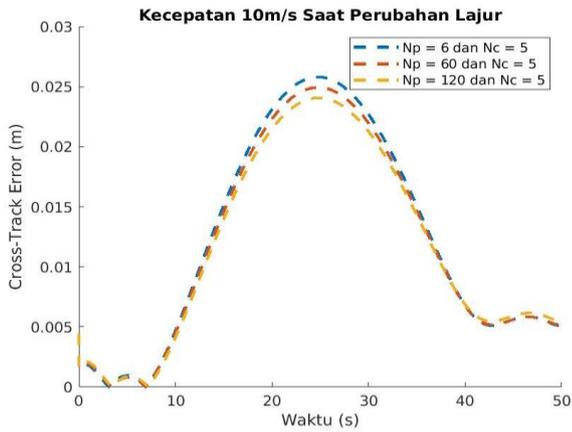
Dalam perancangan dan desain kontroler MPC, hasil desain yang sudah dilakukan akan disimulasikan lalu diuji performansinya. Kriteria kontroler yang didesain harus memiliki galat IAE dan RMSE serendah-rendahnya dan juga memiliki nilai rata-rata XTE yang tidak melebihi setengah lebar dari bodi mobil atau sekitar 0.828 m. Ini dilakukan agar menjamin mobil aman saat melakukan manuver mendahului.

Lebih lanjut, simulasi dilakukan menggunakan beberapa skenario uji. Antara lain yang pertama dengan lintasan polinomial dalam bentuk perubahan lajur dan kedua adalah lintasan sinusoidal, dapat dikatakan semua sinyal referensi yang dipakai adalah *time-varying reference*. Selanjutnya, untuk memperoleh efek perubahan dari horizon kontrol dan horizon prediksi maka dilakukan juga variasi nilai dari N_p dan N_c . Berikutnya, dilakukan juga penggantian bobot atau *weight* pada perubahan sinyal kontrol dan nilai keluaran Q dan R untuk memperoleh efek dari perubahan bobot terhadap performansi sistem. Untuk menguji seberapa baik performa sistem pengaturan yang didesain, tiga metrik evaluasi dan uji performa digunakan pada penelitian ini, antara lain: *Integral Absolute Error* (IAE), *Root Mean Squared Error* (RMSE), dan *Cross-Track Error* (XTE).

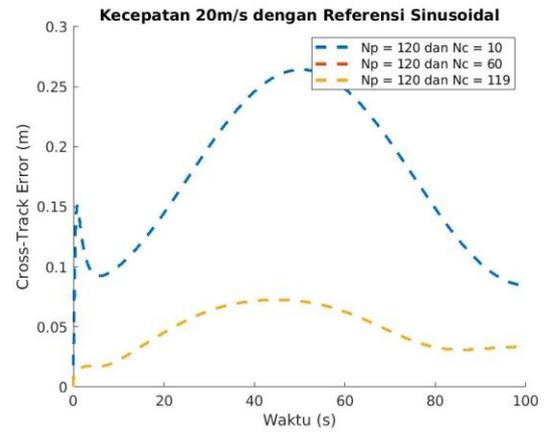
IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

A. Tes Kontrolabilitas dan Stabilitas Sistem

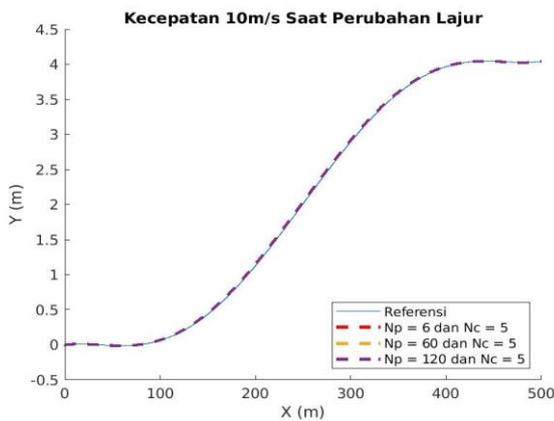
Sebelum melakukan pengetesan stabilitas dan kontrolabilitas sistem, parameter simulasi dari sistem kendaraan otonom kendaraan 4WS4WD dispesifikasikan pada Tabel 1. Parameter sistem yang digunakan pada penelitian ini diambil dari parameter sistem real yaitu mobil



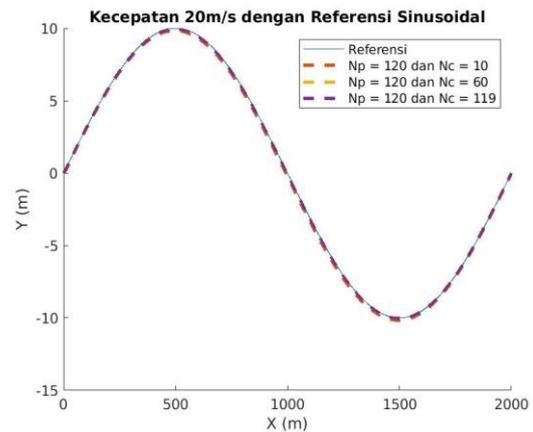
Gambar 4. Cross-track error skenario perubahan lajur ketika Np dan Nc divariasikan dengan $u = 10m/s$.



Gambar 6. Cross-track error skenario sinusoidal ketika Nc divariasikan dengan $u = 20m/s$.



Gambar 5. Hasil respons skenario perubahan lajur ketika Np dan Nc divariasikan dengan $u = 10m/s$.



Gambar 7. Hasil respons skenario sinusoidal ketika Nc divariasikan dengan $u = 20m/s$.

Mercedes Smart Roadster [8]. Setelah mensubstitusikan parameter sistem yang ada, maka diperoleh model dari sistem kendaraan otonom 4WS4WD pada persamaan (25)-(26). Saat kecepatan $u = 10m/s$,

$$\dot{X}_{10m/s} = \begin{bmatrix} -11.99 & -4.98 \\ 4.07 & -17.53 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 57.48 & 62.48 \\ 42.52 & -83.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{bmatrix} \quad (25)$$

Saat kecepatan $u = 20m/s$,

$$\dot{X}_{20m/s} = \begin{bmatrix} -5.99 & -17.49 \\ 2.03 & -8.76 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 57.48 & 62.48 \\ 42.52 & -83.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{bmatrix} \quad (26)$$

Dengan melakukan pengetesan stabilitas dan kontrolabilitas dengan mencari eigenvalue serta matriks kontrolabilitas dari sistem, diperoleh bahwa kedua sistem memiliki eigenvalue bernilai real negative serta matriks kontrolabilitas yang memiliki rank penuh yang berarti sistem stabil dan *controllable*.

B. Hasil Simulasi Sistem

Setelah melakukan simulasi dengan beberapa skenario yaitu dengan memvariasikan nilai horizon prediksi dan horizon kontrol dengan beberapa kombinasi nilai serta mengubah bobot pada sinyal keluaran dan sinyal kontrol

menggunakan beberapa sinyal referensi pada persamaan (27)-(28).

1. Skenario perubahan lajur

$$x_{ref}(t) = ut$$

$$y_{ref}(t) = a_1t^5 + a_2t^4 + a_3t^3 + a_4t^2 + a_5t + a_6$$

$$\theta_{ref}(t) = \text{atan} \left(\frac{y_{ref}(t)}{x_{ref}(t)} \right) \quad (27)$$

2. Skenario sinyal sinusoidal

$$x_{ref}(t) = ut$$

$$y_{ref}(t) = 10 \sin(2\pi * 0.001t)$$

$$\theta_{ref}(t) = \text{atan} \left(\frac{y_{ref}(t)}{x_{ref}(t)} \right) \quad (28)$$

Dimana nilai $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ masing-masing $1.8 * 10^{-7}, -2.3 * 10^{-5}, 8.7 * 10^{-4}, -7.9 * 10^{-3}, 0.019,$ dan $4.4 * 10^{-3}$. Nilai koefisien tersebut diperoleh dari hasil pencocokan kurva dengan 32 data *waypoints* yang sudah dispesifikasikan. Simulasi dilakukan selama 40 sekon pada uji perubahan lajur dan 100 sekon pada uji sinusoidal.

Skenario pertama yang dilakukan adalah perubahan nilai N_p atau horizon prediksi, Gambar 4-5 menunjukkan hasil respons dan XTE dari referensi perubahan lajur saat nilai horizon prediksi divariasikan. Hasil rata-rata RMSE dan IAE dari skenario pertama untuk semua sinyal referensi diperlihatkan pada Tabel 2. Setelah itu untuk skenario kedua,

Tabel 2.
RMSE dan IAE Rata-Rata saat Mengubah Nilai N_p

N_p	N_c	RMSE	IAE
6	5	0.0296	706.32
60	5	0.0310	744.53
120	5	0.0336	805.17

Tabel 3.
RMSE dan IAE Rata-Rata saat Mengubah Nilai N_c

N_p	N_c	RMSE	IAE
120	6	0.0702	1687.15
120	60	0.0312	749.76
120	119	0.0312	749.76

Tabel 4.
RMSE dan IAE Rata-Rata saat Mengubah Nilai Q dan R

Q	R	RMSE	IAE
0.1	1	0.08423	1268.69
1	0.1	0.0935	1238.11
10	0.01	0.0935	1199.12

dilakukan simulasi dengan sinyal referensi yang sama namun dengan mengubah nilai dari horizon kontrol N_c . XTE dan hasil respon dari simulasi sinyal referensi sinusoidal dengan mengubah sinyal referensi dapat dilihat pada Gambar 6-7. Hasil rata-rata RMSE dan IAE dari skenario kedua untuk semua sinyal referensi diperlihatkan pada Tabel 3. Dan skenario terakhir yaitu perubahan nilai bobot perubahan sinyal kontrol dan sinyal keluaran hasil rata rata IAE dan RMSE-nya dapat dilihat pada Tabel 4.

V. KESIMPULAN

Pada penelitian kali ini, diperoleh bahwa kontroler MPC yang didesain untuk mengendalikan kemudi dari kendaraan otonom 4WS4WD berhasil membawa sistem untuk mengikuti dua skenario sinyal referensi yang telah dispesifikasikan yaitu perubahan lajur dan sinyal sinusoidal untuk dua kecepatan longitudinal berbeda. Selanjutnya, perubahan nilai dari N_p dan N_c memiliki beberapa pengaruh yang signifikan pada respons dari sistem. Dalam kasus ini, tidak semata-mata dengan menaikkan N_p nilai respons yang diperoleh akan menjadi baik. Di sisi lain, saat nilai N_c dinaikkan respons sistem yang dihasilkan semakin lebih baik, ini ditunjukkan dengan nilai IAE dan RMSE yang semakin baik pada metrik evaluasi yang dipakai untuk pengujian. Selain itu, pengaruh perubahan nilai Q dan R juga memberikan dampak terhadap respon sistem. Dalam penelitian ini ditemukan bahwa nilai $N_p = 6$ dan $N_c = 5$ memiliki nilai rata-rata RMSE dan IAE paling minimal jika dikomparasikan dengan kombinasi nilai parameter lainnya. Lebih lanjut, XTE yang dihasilkan pada semua skenario simulasi berhasil berada pada kriteria desain yang diinginkan yaitu memiliki nilai XTE di bawah lebar bodi mobil (0.82 m). Oleh karena itu, dari beberapa uji yang telah dilakukan,

ditemukan bahwa pemilihan kombinasi parameter kontroler seperti N_p , N_c , Q , dan R harus dilakukan dengan cermat dan teliti sehingga dapat diperoleh respon terbaik dari sistem yang dikendalikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Jana, Y. Tian, K. Pei, and B. Ray, "DeepTest: Automated Testing of Deep Deural Network Driven Autonomous Cars," in *Proceedings of the 40th International Conference on Software Engineering - ICSE '18*, 2018, vol. 2018-May, pp. 303–314, doi: 10.1145/3180155.3180220.
- [2] D. Watzenig and M. Horn, *Automated Driving: Safer and More Efficient Future Driving*. Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
- [3] E. Kayacan and O. Kaynak, "Grey Prediction Based Control of A Non-linear Liquid Level System Using PID Type Fuzzy Controller," in *2006 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM*, 2006, p. 5, doi: 10.1109/ICMECH.2006.252541.
- [4] P. S. R. V. R. S. S. Vidyasagar and K. S. Swamp, "Laguerre Functions Based Model Predictive Frequency and Voltage Control of Isolated Micro-Grid," in *2016 IEEE Annual India Conference, INDICON 2016*, 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/INDICON.2016.7839080.
- [5] B. Paden, M. Cap, S. Z. Yong, D. Yershov, and E. Frazzoli, "A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles," *IEEE Trans. Intell. Veh.*, vol. 1, no. 1, pp. 33–55, 2016, doi: 10.1109/TIV.2016.2578706.
- [6] P. Polack, F. Althe, B. DAndrea-Novel, and A. De La Fortelle, "The Kinematic Bicycle Model: A Consistent Model for Planning Feasible Trajectories for Autonomous Vehicles?," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, 2017, pp. 812–818, doi: 10.1109/IVS.2017.7995816.
- [7] F. Iervolino and A. Sakhnevych, "Modeling, Simulation and Control of A 4WD Electric Vehicle with In-Wheel Motors," in *Mechanisms and Machine Science*, 2018, vol. 49, pp. 444–455, doi: 10.1007/978-3-319-61276-8_48.
- [8] F. Fahimi, "Full drive-by-wire dynamic control for four-wheel-steer all-wheel-drive vehicles," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 51, no. 3, pp. 360–376, 2013, doi: 10.1080/00423114.2012.743668.
- [9] K. Berntorp, T. Hoang, R. Quirynen, and S. Di Cairano, "Control Architecture Design for Autonomous Vehicles," in *2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications, CCTA 2018*, 2018, pp. 404–411, doi: 10.1109/CCTA.2018.8511371.
- [10] J. Han, Y. Hu, and S. Dian, "The State-of-The-Art of Model Predictive Control in Recent Years," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 428, no. 1, p. 12035, doi: 10.1088/1757-899X/428/1/012035.
- [11] S. J. Qin and T. A. Badgwell, "A survey of industrial model predictive control technology," *Control Eng. Pract.*, vol. 11, no. 7, pp. 733–764, 2003, doi: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.
- [12] E. F. Camacho and C. Bordons, *Model Predictive Control*. London: Springer, 2007.
- [13] G. Serale, M. Fiorentini, A. Capozzoli, D. Bernardini, and A. Bemporad, "Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: problem formulation, applications and opportunities," *Energies*, vol. 11, no. 3, p. 631, 2018, doi: 10.3390/en11030631.
- [14] C. Ekaputri and A. Syaichu-Rohman, "Model Predictive Control (MPC) Design and Implementation Using Algorithm-3 on Board SPARTAN 6 FPGA SP605 Evaluation Kit," in *Proceedings of 2013 3rd International Conference on Instrumentation, Control and Automation, ICA 2013*, 2013, p. 6, doi: 10.1109/ICA.2013.6734056.
- [15] T. Geyer, "Model Predictive Control of High Power Converters and Industrial Drives," in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2017*, 2017, vol. 2017-Janua, doi: 10.1109/ECCE.2017.8096978.
- [16] M. Zanon and S. Gros, "Safe reinforcement learning using robust MPC," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2020, doi: 10.1109/TAC.2020.3024161.