

Kontrol Kemudi Mobil dengan Pengaruh Variasi Kecepatan Longitudinal pada Kelengkungan Jalan yang Berbeda-Beda Menggunakan Model Predictive Control

A.M. Hawali Akbar, Ari Santoso, dan Mohamad Abdul Hady
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: santoso904@gmail.com

Abstrak—Salah satu hal yang menjadi fokus pada tugas akhir ini, yaitu perubahan dinamika mobil akibat kecepatan longitudinalnya yang berubah-ubah, di mana tantangannya yaitu dapat mengendalikan steering dari kendaraan sehingga agar tetap pada trek yang diinginkan. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini akan dikontrol lintasan, dengan mengontrol steering dari kendaraan dengan metode kontrol multi-stage MPC (Model Predictive Control). Hasil tugas akhir menunjukkan bahwa kontroler multi-stage MPC, dapat mengikuti referensi yang diinginkan. Kontroler multi-stage MPC, dapat menyelesaikan mengikuti referensi yang diinginkan dengan error yang masih dapat ditoleransi hingga 10^{-2} .

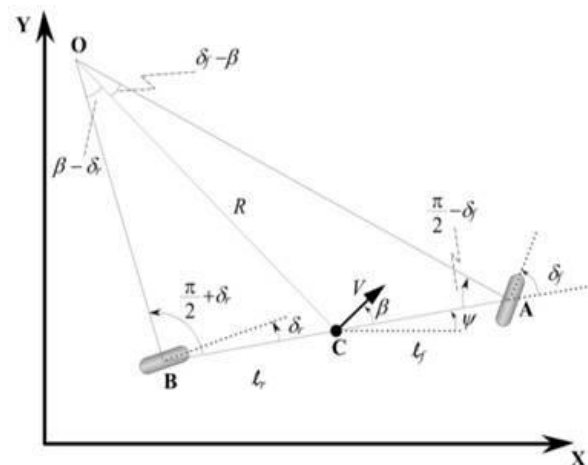
Kata Kunci—Mobil Autonomous, Multi-Stage MPC, Steering.

I. PENDAHULUAN

MOBIL sekarang mulai didominasi dengan mobil autonomous. Peralihan dari mobil yang dikendarai secara manual ke mobil autonomous terus dilakukan. Faktor keselamatan kendaraan pun juga berubah. Pada mobil manual, kecelakaan terjadi mayoritas diakibatkan oleh kesalahan pengemudi, akibat ketidakwaspadaan terhadap jalan [1]. Akan tetapi pada mobil autonomous kecelakaan lalu lintas terjadi dari dalam diakibatkan paling besar akibat dari kegagalan dari sistem itu sendiri [2]. Jaminan keselamatan berkendara perlu dievaluasi lagi dan studi terkait akan kegagalan sistem tersebut mesti terus dilakukan agar dapat meminimalisir bahkan bisa menghilangkan resiko terjadinya kecelakaan.

Saat ini, sistem kontrol cerdas telah dirancang untuk menangani gerakan kendaraan transien yang tidak stabil dalam jarak aman yang terjamin. Namun, studi tentang kinerja penanganan kendaraan, sebagai aspek penting dalam dinamika non-linier kendaraan, tidak pernah ketinggalan zaman, dan wawasan yang mendalam tentang dinamika akan membawa manfaat bagi desain pengendali tingkat lanjut [3]. Dinamika nonlinier kendaraan ini sendiri, diakibatkan banyak faktor, salah satu faktor yang akan menjadi fokus penelitian ini, yaitu ketidak-linieran dinamika kendaraan akibat kecepatan kendaraan yang tidak konstan. Tantangannya yaitu dapat mengendalikan setir kemudi menanggapi perubahan dinamika kendaraan tersebut.

Untuk dapat menyelesaikan permasalahan tersebut, maka digunakan metode kontrol model predictive control. Di mana, metode ini baik dalam menangani kendala sistem dan memprediksi ke depan proses dari sistem. Selain itu metode ini baik digunakan pada sistem, di mana nilai variabelnya



Gambar 1. Kinematika Sepeda.

dibatasi. [4]

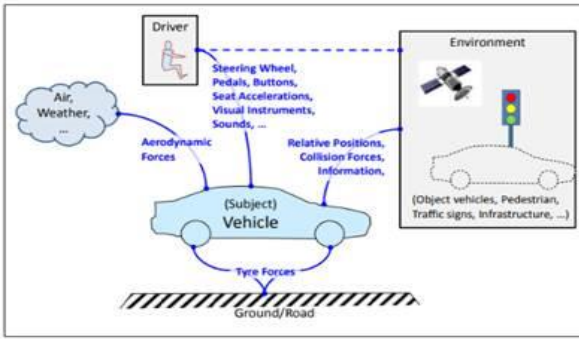
II. METODE TUGAS AKHIR

A. Model Kinematika Sepeda

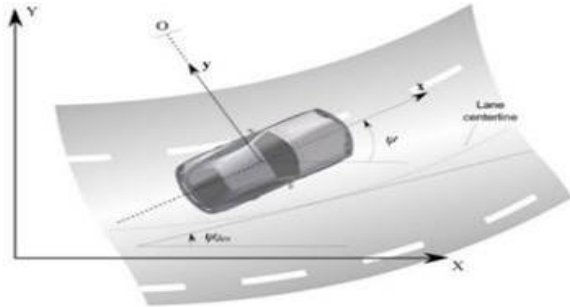
Di bawah asumsi tertentu yang dijelaskan di bawah ini, model kinematik untuk gerak lateral kendaraan dapat dikembangkan. Model seperti itu memberikan gambaran matematis tentang gerak kendaraan tanpa mempertimbangkan gaya-gaya yang mempengaruhi gerak tersebut. Persamaan gerak didasarkan murni pada hubungan geometris yang mengatur sistem.

Pada model sepeda yang tertera pada Gambar 1, dua roda depan kiri dan kanan diwakili oleh satu roda tunggal di titik A. Demikian pula roda belakang diwakili oleh satu roda belakang tengah di titik B.

Asumsi utama yang digunakan dalam pengembangan model kinematika adalah bahwa vektor kecepatan di titik A dan B masing-masing searah dengan orientasi roda depan dan belakang. Dengan kata lain, vektor kecepatan pada roda depan membentuk sudut δ_f dengan sumbu longitudinal kendaraan. Demikian pula vektor kecepatan pada roda belakang membentuk sudut δ_r dengan sumbu longitudinal kendaraan. Ini setara dengan dengan asumsi bahwa "sudut selip" di kedua roda adalah nol. Ini adalah asumsi yang masuk akal untuk gerak kendaraan dengan kecepatan rendah (misalnya, untuk kecepatan kurang dari 5 m/s). Pada kecepatan rendah, gaya lateral yang dihasilkan ban kecil. Untuk mengemudi di jalan melingkar dengan jari-jari R ,



Gambar 2. Faktor Pengaruh Dinamika Kendaraan.



Gambar 3. Model Sepeda dari Kendaraan.

gaya lateral total dari kedua ban adalah

$$F_y = \frac{mV^2}{R} \quad (1)$$

Dimana bervariasi dengan Kecepatan V dan Kecil saat Kecepatan rendah. Saat Gaya lateralnya kecil, maka dapat diasumsikan vektor kecepatan pada setiap bannya sama dengan arah ban. Sudut Pergerakan dari mobil yaitu

$$\gamma = \psi + \beta \quad (2)$$

Dengan mengaplikasikan rumus sinus ke segitiga OCA pada Gambar 1

$$\frac{\sin(\delta_f - \beta)}{l_f} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} - \delta_f)}{R} \quad (3)$$

Dengan Mengaplikasi Persamaan yang sama ke segitiga OCB

$$\frac{\sin(\beta - \delta_r)}{l_r} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} - \delta_r)}{R} \quad (4)$$

$$\frac{\sin(\delta_f) \cos(\beta) - \sin(\beta) \cos(\delta_f)}{l_f} = \frac{\cos(\delta_f)}{R} \quad (5)$$

$$\frac{\cos(\delta_r) \sin(\beta) - \cos(\beta) \sin(\delta_r)}{l_r} = \frac{\cos(\delta_r)}{R} \quad (6)$$

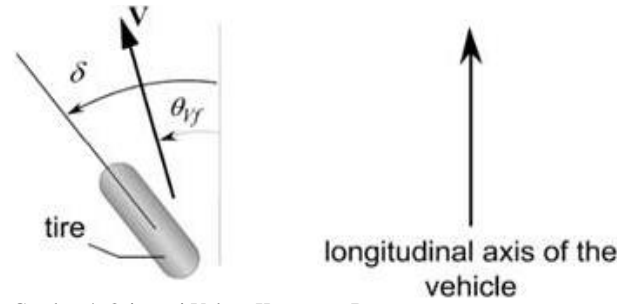
Kalikan kedua bagian, dari persamaan (5) dengan $\frac{l_f}{\cos(\delta_f)}$ maka diperoleh.

$$\tan(\delta_f) \cos(\beta) - \sin(\beta) = \frac{l_f}{R} \quad (7)$$

Kalikan kedua bagian, dari persamaan (6) dengan $\frac{l_r}{\cos(\delta_r)}$ maka diperoleh.

$$\sin(\beta) - \tan(\delta_r) \cos(\beta) = \frac{l_r}{R} \quad (8)$$

Tambahkan Persamaan (7) dan (8)



Gambar 4. Orientasi Vektor Kecepatan Ban.

Tabel 1. Parameter Plan

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Massa Mobil (m)	1575	Kg
2	Inertia Mobil Terhadap Yaw (Iz)	2875	Kg.m/s ²
3	Panjang Mobil dari depan ke Cog (I _f)	1.2	m
4	Panjang Mobil dari belakang ke Cog (I _r)	1.6	m
5	Koefisien Gesek Roda Depan (C _f)	19000	-
6	Koefisien Gesek Roda Belakang (C _r)	33000	-

$$\{\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)\} \cos(\beta) = \frac{l_r + l_f}{R} \quad (9)$$

Jika kita asumsikan bahwa jari-jari jalur kendaraan berubah secara perlahan akibat rendahnya kecepatan kendaraan, maka laju perubahan orientasi kendaraan ($\dot{\psi}$) sama dengan kecepatan angular kendaraan. Karena Kecepatan Angular $\frac{V}{R}$ maka.

$$\dot{\psi} = \frac{V}{R} \quad (10)$$

Menggunakan (9) dan (10), maka dapat dituliskan ulang menjadi.

$$\dot{\psi} = \frac{V \cos(\beta)}{l_f + l_r} (\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)) \quad (11)$$

Maka Seluruh Persamaan Kinematika dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\dot{X} = V \cos(\psi + \beta) \quad (12)$$

$$\dot{Y} = V \sin(\psi + \beta) \quad (13)$$

$$\dot{\psi} = \frac{V \cos(\beta)}{l_f + l_r} (\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)) \quad (14)$$

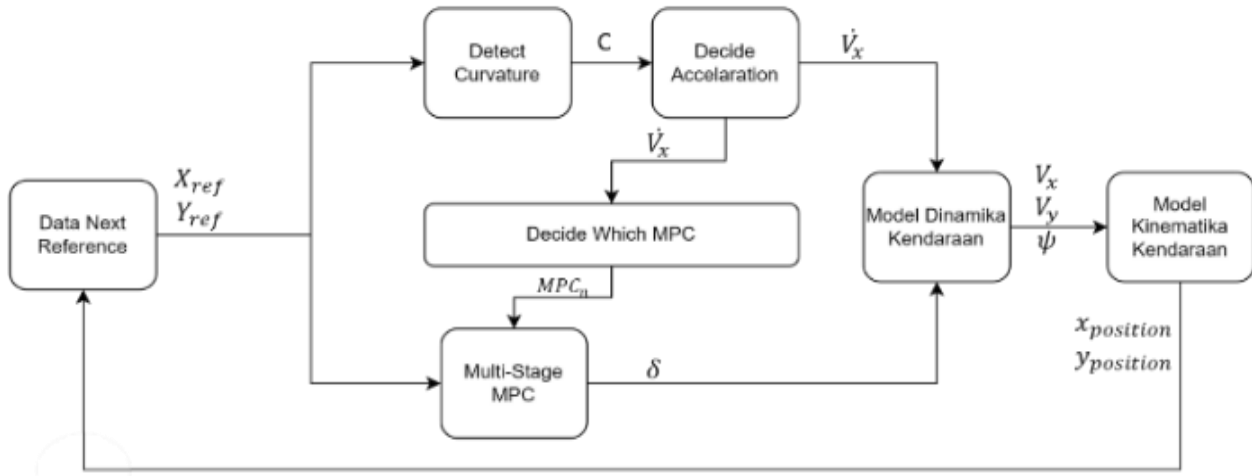
Dalam Model ini terdapat 3 input, δ_f , δ_r dan V. Kecepatan V adalah Variabel Eksternal yang bisa diasumsikan berupa Fungsi Time Varian atau dapat diperoleh dari model longitudinal mobil. Sedangkan Slip Angle β dapat diperoleh dengan mengalikan persamaan (7) dengan l_r dan dikurangi dengan persamaan (8) yang dikalikan dengan l_f [5] :

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{l_f \tan \delta_r + l_r \tan \delta_f}{l_f + l_r} \right) \quad (15)$$

Dari Model Kinematika tersebut, diberikan asumsi, β kecil, sehingga diperoleh.

$$\dot{x} = V_x \cos \psi - V_y \sin \psi \quad (16)$$

$$\dot{y} = V_x \sin \psi + V_y \cos \psi \quad (17)$$



Gambar 5. Blok Diagram Simulasi.

Dengan V_x , V_y , dan ψ diperoleh dari state dinamikanya.

B. Model Dinamika Kendaraan pada Model Sepeda

Studi tentang dinamika kendaraan dimulai dari interaksi antara kendaraan dengan lingkungannya, seperti terlihat pada Gambar 2. Ban kendaraan adalah struktur utama untuk mentransfer beban yang menghasilkan gerakan yang diinginkan (berat kendaraan, percepatan setir dan rem) dan gangguan yang tidak diinginkan (getaran jalan, gundukan dan sebagainya). Sebagai tambahan beban aerodinamis pada kendaraan akan menciptakan gaya dan momen yang benar-benar tidak diinginkan (hambatan angin, hembusan samping, dll.). Sehingga, diperlukan model dinamika, agar memperoleh hasil yang akurat. [6]

Model Sepeda dari Kendaraan dengan 2 DOF dipertimbangkan, seperti Gambar 3. Dua DOF direpresentasi dengan posisi lateral mobil y dan sudut yaw ψ .

Posisi Lateral Kendaraan diukur sepanjang sumbu lateral dari kendaraan sampai titik O yang mana merupakan titik pusat dari rotasi kendaraan. Sudut Yaw dari Kendaraan ψ dihitung berdasarkan sumbu global X. kecepatan Longitudinal berada pada titik pusat V_x . Dengan Mengaplikasikan Hukum Newton Kedua untuk gerak sepanjang sumbu Y, diperoleh

$$ma_y = F_{yf} + F_{yr} \quad (18)$$

Dimana $a_y = \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_{inertial}$ adalah Percepatan Inertia dari kendaraan di titik CoG pada arah sumbu y dan F_{yf} dan F_{yr} adalah gaya lateral ban depan dan belakang berturut-turut. Dua ketentuan yang mempengaruhi nilai a_y : akselerasi \ddot{y} yang dikarenakan pergerakan sepanjang sumbu y dan percepatan sentripetal $V_x\dot{\psi}$. Maka.

$$a_y = \ddot{y} + V_x\dot{\psi} \quad (19)$$

Dengan Mensubstitusi Persamaan (17) kedalam persamaan (16), persamaan gerak translasi lateral dari kendaraan didapatkan sebagai berikut.

$$m(\ddot{y} + \dot{\psi}V_x) = F_{yf} + F_{yr} \quad (20)$$

Momen Gaya pada sumbu z menghasilkan persamaan

untuk dinamikan yaw yaitu

$$I_z\ddot{\psi} = l_f F_{yf} - l_r F_{yr} \quad (21)$$

Langkah selanjutnya gaya lateral ban F_{yf} dan F_{yr} yang bekerja pada kendaraan. Hasil Eksperimen menunjukkan gaya lateral ban proportional terhadap sudut selip untuk sudut selip yang kecil. Sudut slip dari kendaraan didefinisikan sebagai sudut antara orientasi ban dan orientasi vektor kecepatan dari ban. Pada gambar 4, sudut selip dari roda depan, yaitu.

$$\alpha_f = \delta - \theta_{vf} \quad (22)$$

Sedangkan sudut slip ban belakang yaitu

$$\alpha_r = -\theta_{vr} \quad (23)$$

Gaya Lateral dari Ban depan Kendaraan dapat dituliskan sebagai berikut

$$F_{yf} = 2C_{\alpha f}(\delta - \theta_{vf}) \quad (24)$$

Sedangkan Gaya lateral untuk ban belakang yaitu.

$$F_{yr} = 2C_{\alpha r}(-\theta_{vr}) \quad (25)$$

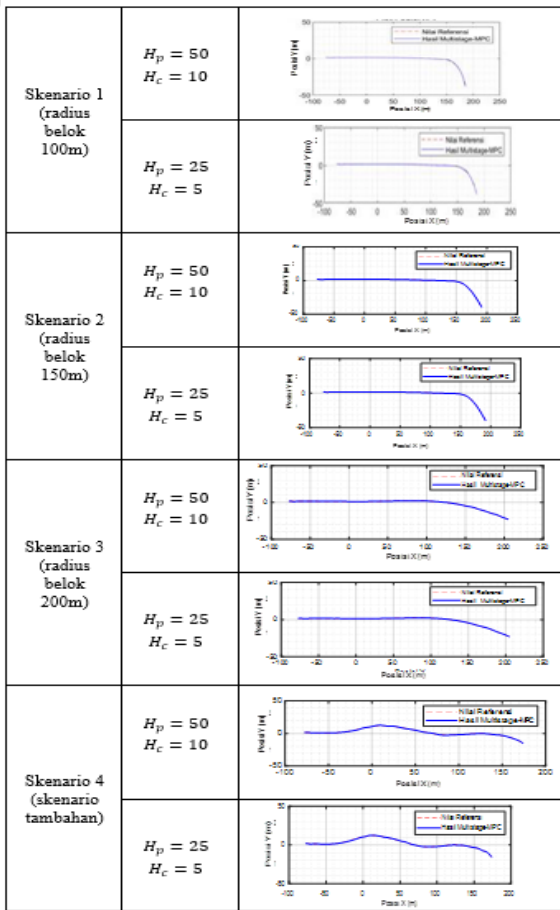
Persamaan Berikut dapat digunakan untuk menghitung θ_{vf} dan θ_{vr} [5]

$$\tan(\theta_{vf}) = \frac{V_y + l_f \dot{\psi}}{V_x} \quad (26)$$

$$\tan(\theta_{vr}) = \frac{V_y - l_r \dot{\psi}}{V_x} \quad (27)$$

Untuk dapat melinearkan dinamika kendaraan tersebut, maka perlu diasumsikan nilai sudut arah kecepatan yang kecil, sehingga $\theta_{vf} \approx$ kecil, maka $\tan(\theta_{vf}) \approx \theta_{vf}$. Untuk Kecepatan longitudinal diperoleh dari persamaan kecepatan akibat pengaruh percepatan biasa, sehingga diperoleh seluruh persamaan tersebut dapat dituliskan ke dalam bentuk state space, sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\psi} \\ \dot{V}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{mV_x} & 0 & -V_x - \frac{2C_{\alpha f} l_f + 2C_{\alpha r} l_r}{mV_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2l_f C_{\alpha f} - 2l_r C_{\alpha r}}{I_z V_x} & 0 & -\frac{2l_f^2 C_{\alpha f} - 2l_r^2 C_{\alpha r}}{I_z V_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ V_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{\alpha f}}{m} \\ 0 \\ \frac{2l_f C_{\alpha f}}{I_z} \end{bmatrix} \delta \quad (28)$$



Gambar 6. Hasil Plot X-Y dari Berbagai Skenario.

C. Identifikasi Paramater Plan

Dari persamaan *state space* dinamika lateral mobil pada persamaan (28), maka diidentifikasi nilai parameter yang akan digunakan untuk simulasi ini. Adapun nilai parameter yang akan digunakan, berdasarkan penelitian sebelumnya tertera pada Tabel 1 [7]. Dari nilai parameter tersebut, dimasukkan ke dalam persamaan *state space* pada persamaan (28) sebelumnya, sehingga diperoleh persamaan *state space* dengan nilai numeriknya, sebagai berikut.

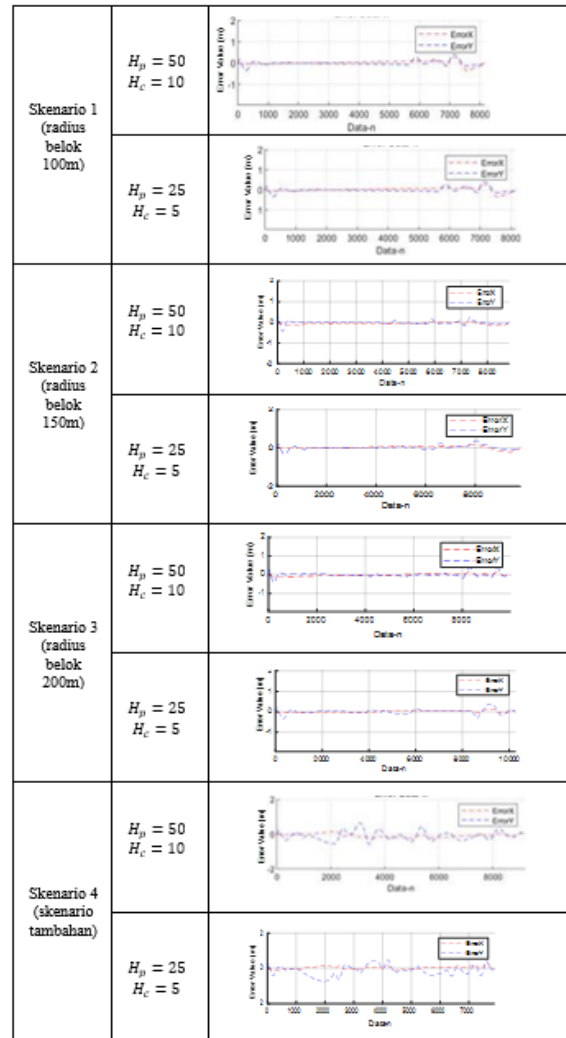
$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\psi} \\ \dot{V}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{66.0317}{V_x} & 0 & -V_x - \frac{42.9206}{V_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{20.8696}{V_x} & 0 & -\frac{77.8017}{V_x} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \psi \\ \psi \\ V_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 24.1270 \\ 0 \\ 15.8609 \\ 0 \end{bmatrix} \delta$$

nilai dari V_x tidak dimasukkan, karena akan divariasikan berdasarkan kelengkungan jalan. Variasi V_x berdasarkan kelengkungan jalan [8] dilakukan sebagai berikut.

$$K = \frac{x'y'' - y'x''}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}}$$

di mana dalam persamaan kelengkungan ini, terdapat turunan titik referensi sebanyak 2 kali, sehingga diperlukan 3 titik untuk menentukan kelengkungan dari jalan sekarang, yaitu berupa titik sekarang (x_n, y_n) , titik referensi (x_{ref}, y_{ref}) dan titik di depannya referensi (x_{depan}, y_{depan}) . Sehingga nilai dari masing-masing variabel tersebut dapat ditentukan, sebagai berikut.

$$x' = \frac{x_{ref} - x_n}{dt}$$



Gambar 7. Grafik Error Sepanjang Referensi.

$$x'_2 = \frac{x_{depan} - x_n}{dt}$$

$$x'' = \frac{x'_2 - x'}{dt}$$

begitu pula untuk posisi y-nya, sebagai berikut.

$$x' = \frac{x_{ref} - x_n}{dt}$$

$$x'_2 = \frac{x_{depan} - x_n}{dt}$$

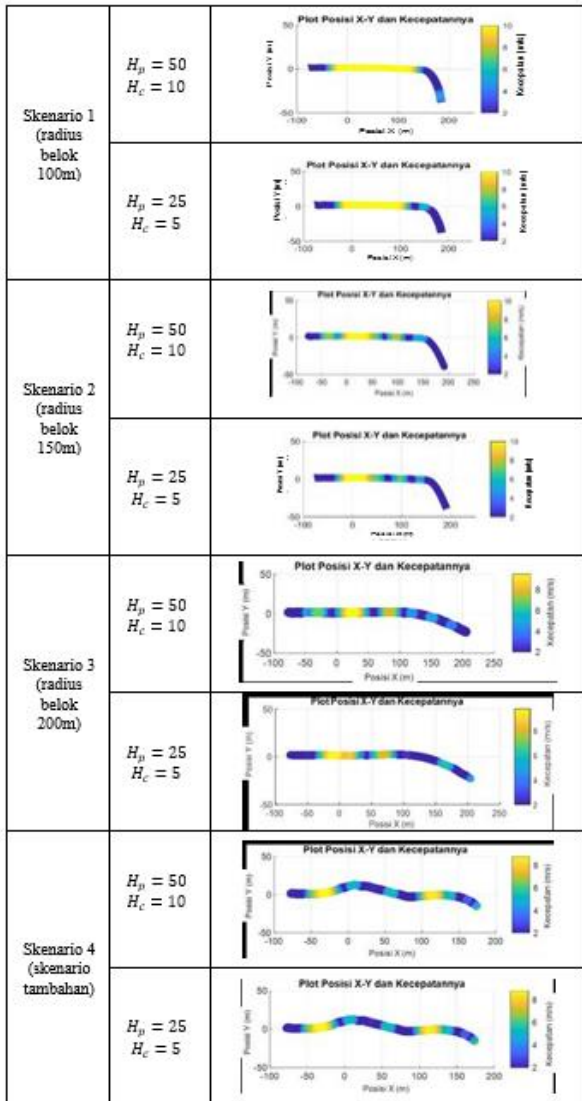
$$x'' = \frac{x'_2 - x'}{dt}$$

Dari kelengkungan jalan ini, Kecepatan longitudinalnya (V_x) ditingkatkan apabila tidak terdapat kelengkungan jalan hingga maksimum 10 m/s dan apabila jalan terdapat kelengkungan akan diturunkan kecepatannya hingga minimum 2 m/s.

D. Desain Kontroler MPC

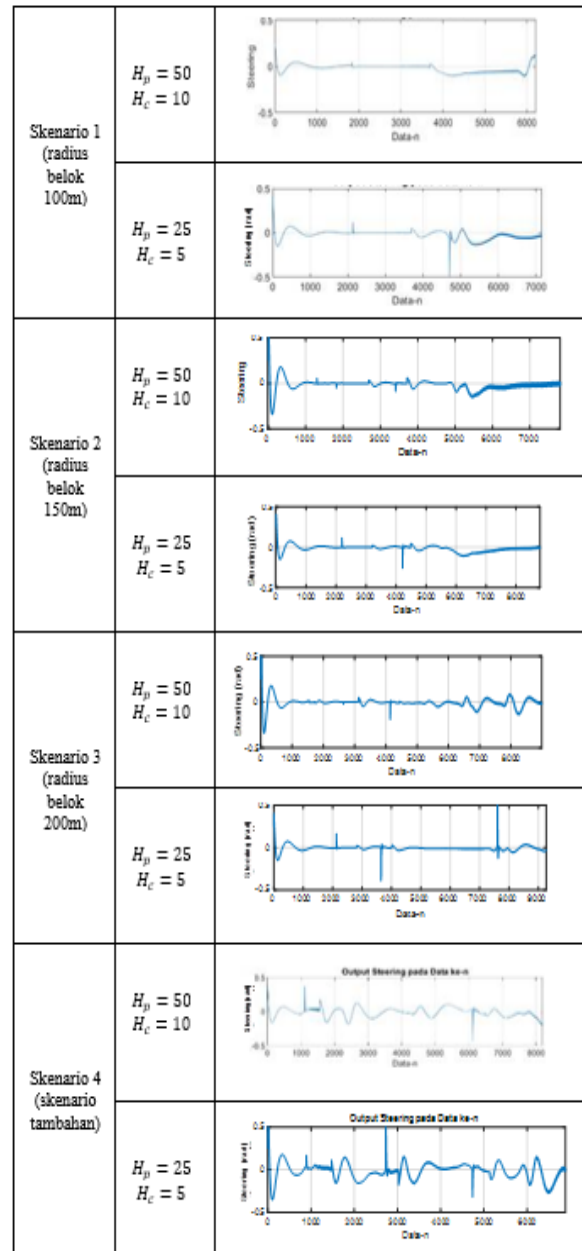
Struktur dasar dari kontroler MPC, yaitu model dan optimizer. Model di sini yaitu model dinamika lateral yang dilinearisasi beserta gerak longitudinalnya. Sedangkan optimizer terdiri dari fungsi kriteria (*cost function*) dan batasan (*constraint*)[9]. Skema dari kontroler MPC dapat dilihat pada Gambar 4. Adapun secara lengkapnya algoritma

dari kontroler MPC ini, sebagai berikut.



Gambar 8. Grafik Kecepatan Sepanjang Referensi.

1. Pertama ada sinyal masukan yang akan menentukan tipe MPC yang akan digunakan, bergantung dari seberapa banyak model awal yang dimasukkan pada MPC.
2. Kemudian keluaran proses yang akan datang untuk rentang horizon (H_p) yang ditentukan yang dinamakan prediction horizon, diprediksi tiap waktu sampling, contohnya apabila time sampling 0.01 dan prediction horizon sebesar 100, maka controller bisa memprediksi hingga 0.01 dikali 100, 0.1 detik kedepan. Keluaran dari proses ini $y(k+1 | k)$ untuk $i = 1 \dots H_p$ bergantung dari nilai masukan dan keluaran lampau dan kepada sinyal kendali yang akan datang $u(k+1 | k)$, $i = 0 \dots H_p$
3. Sinyal kontroler dihitung dari fungsi cost function dan constraint yang telah ditetapkan, yang mana digunakan untuk menjaga agar variabel output tetap selalu mengikuti titik referensi $r(k+1)$ yang diinginkan, atau nilai errornya kecil.
4. Sinyal kontroler $u(k|k)$ masuk ke dalam model plan, sedangkan sinyal kontrol terprediksi berikutnya dibuang karena pada sampling berikutnya, output $y(k+1)$ sudah terdapat nilainya. Maka kembali ke langkah pertama dengan nilai keluaran model yang baru, dan perhitungan



Gambar 9. Output Steering dari Kendaraan.

prediction horizon pun diulang kembali, hingga dia mencapai titik referensinya. Tipe MPCnya pun dapat juga berubah tergantung dari sinyal masukan yang akan menentukan MPC mana yang digunakan. Proses ini dilakukan berulang kali tergantung seberapa lama sistem mencapai referensi dan berapa banyak jumlah titik referensi yang dimasukkan.

Model pada plan MPC ini dibagi menjadi 2, yaitu MPC untuk kecepatan rendah, dan kecepatan tinggi. Kecepatan rendah digunakan pada rentang kecepatan 2 m/s hingga 6 m/s sedangkan untuk kecepatan tinggi digunakan pada rentang kecepatan di atas 6 m/s hingga 10 m/s. Sehingga digunakan 2 tipe MPC, pada penelitian ini. Adapun linearisasi Pemodelan model plan MPC dilakukan pada kecepatan 2 m/s dan 10m/s. Dengan menggunakan toolbox matlab diperoleh hasil model *state space* linearisasi, sebagai berikut.

1) Model State Space untuk kecepatan 2 m/s

Dengan linearisasi dari model lateral yang diperoleh sebelumnya, dan dengan ditambahkan state baru berupa

Tabel 2.
Ringkasan Hasil Simulasi

Skenario	MPC Parameter		Error Posisi X (m)	Error Posisi Y (m)	Waktu Simulasi (detik)
	H_p	H_c			
1	50	10	2.8×10^{-2}	1.41×10^{-2}	80.81
	25	5	9.81×10^{-3}	1.12×10^{-2}	88.91
2	50	10	5.62×10^{-3}	5.67×10^{-3}	78.28
	25	5	7.48×10^{-3}	1.17×10^{-3}	88.17
3	50	10	3.30×10^{-3}	1.01×10^{-2}	89.86
	25	5	3.30×10^{-3}	2.21×10^{-2}	94.23
4	50	10	6.80×10^{-3}	9.44×10^{-2}	68.85
	25	5	1.51×10^{-2}	6.60×10^{-2}	81.92

posisi longitudinal x, menggunakan toolbox matlab, dan dengan memasukkan kecepatan longitudinalnya 2 m/s, diperoleh Model untuk MPC Pertama sebagai berikut.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -33.0159 & 19.4603 & 0 & 0 \\ 0 & 10.4348 & -38.9009 & 0 & 0 \\ -0.0100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 24.1270 \\ 15.8609 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

2) Model State Space untuk kecepatan 10 m/s

Dengan dilakukan hal yang sama seperti sebelumnya, akan tetapi dengan kecepatan longitudinal berupa 10 m/s, maka diperoleh model state space untuk MPC yang kedua sebagai berikut.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -6.6032 & -5.7079 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0870 & -7.7802 & 0 & 0 \\ -0.0100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 24.1270 \\ 15.8609 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Nilai output Prediksi dari MPC, ditentukan berdasarkan banyaknya jumlah control horizon dan prediction horizon. Adapun prediksi output MPC, didefinisikan sebagai berikut.

$$\vec{Y} = Fx(k) + \Phi \vec{U}$$

Dengan Matriks F dan Φ , diformulasikan Sebagai berikut.

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^N_p \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ CA^{N_p-1} & CA^{N_p-1}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}$$

dimana matriks A dan B diperoleh dari model MPC yang dijelaskan sebelumnya, Matriks C merupakan matriks output state yang dikendalikan, yaitu posisi x dan y dari kendaraan. Untuk X merupakan matriks state yang dijelaskan dari model MPC sebelumnya dan U merupakan matriks input kontrol dan prediksinya. Di sini akan divariasikan nilai Control

Horizon (N_p) dan Prediction Horizon (N_c), yaitu $N_p = 25,50$ dan $N_c = 5,10$ untuk Kontroler MPC-1 dan $N_p = 100$ dan $N_c = 10$ untuk kontroler MPC-2. MPC-2 ini lebih besar prediksinya dikarenakan kecepatan longitudinal yang cukup tinggi, sehingga membutuhkan prediksi yang lebih besar agar dapat mencapai trajektori yang akurat.

Batasan atau constraint pada kontroler MPC dititikberatkan pada putaran *steering* (δ) dari kendaraan. Sama halnya dengan dunia nyata, putaran *steering* pada simulasi ini harus dibatasi juga, agar simulasi ini dapat berjalan sesuai dengan kenyataannya, pada penelitian ini, putaran *steering* diasumsikan tidak melebihi 0.5234 Rad, maka batas dari output steering, yaitu maximum : 0.5234 Rad dan minimum -0.5234 Rad. Dimana memiliki target *steering*, yaitu 0 Rad agar Gerakan dari *steering* berusaha mencapai titik nyaman dari pengemudi, dengan weighting *steering* (w_δ) sebesar 1.

Sedangkan output yang dimanipulasi disini berupa posisi x dan posisi y yang mana tidak memiliki batasan, di mana memiliki prioritas nilai yang dicapai sama, sehingga weighting ($w_{x,y}$) untuk masing-masing output 1:1.

Sehingga diperoleh Fungsi cost function yang akan dioptimisasi kontroler MPC, sebagai berikut.

$$J = \sum_{t=1}^N w_{x,y} \left| |Y_{ref} - \vec{Y}| \right|^2 + \sum_{t=1}^N w_\delta \left| |\Delta\delta| \right|^2$$

Subject to :

$$-0.5234 \text{ rad} < \delta < 0.5234 \text{ rad}$$

di mana persamaan cost function ini, akan diselesaikan dengan algoritma Quadratic Programming [10].

E. Penentuan Skenario

Adapun skenario dari MPC akan dibuat di driving skenario toolbox matlab, kemudian titiknya diperbanyak dengan metode interpolation. Skenario ini terdiri dari tiga, yana mana letak perbedaan dari masing-masing skenario, yaitu di lintasan terakhir yang dilalui mereka, yaitu belokan yang curam, sedikit curam, dan tidak terlalu curam (atau hampir lurus).

F. Diagram Blok Simulasi

Dari keseluruhan bagian yang telah dijelaskan, maka dapat dibuat blok diagram sistem untuk simulasinya tertera pada Gambar 5.

III HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan dalam tiga skenario yang dijelaskan pada subbab penentuan skenario sebelumnya, dengan variasi *prediction* dan *control horizon*, *cost Function* dan *constraint*-nya dari subbab desain kontroler MPC. Sehingga diperoleh hasil sebagai berikut.

A. Simulasi

Diperoleh hasil simulasi untuk semua skenario dan variasi prediction control horizon dalam Gambar 6. Hasil simulasi menunjukkan kontroler multistage-MPC berhasil mengikuti referensi yang diinginkan dengan variasi radius belokan yang berbeda-beda. Skenario tambahan juga dilakukan untuk menguji performa kontroler lebih lanjut, dimana masih dapat mengikut referensi yang diinginkan. Untuk Grafik Error

sepanjang referensinya tertera pada Gambar 7. Error-nya juga tergolong masih kecil, karena hingga 10^{-2} m (untuk lebih lengkapnya dalam pembahasan). Artinya masih dapat ditoleransi untuk digunakan di dunia sebenarnya. Untuk perubahan kecepatan seiring dengan ada tidaknya kelengkungan jalan, tertera pada Gambar 8. Untuk kecepataannya sudah bervariasi, yang merupakan bagian dari pengujian kontroler ini. Terlihat kecepataannya meningkat ketika menghadapi jalan yang lurus, dan melambat ketika menghadapi jalan yang berbelok. Untuk output steeringnya, tertera pada Gambar 9. Output Steeringnya juga masih dapat digunakan dalam dunia nyata, karena *rate*-nya, masih dapat ditoleransi. Untuk overshoot pada beberapa titik data-n terjadi, karena perubahan tipe kontroler.

B. Pembahasan

Dari simulasi skenario tadi, diperoleh ringkasan hasil tertera pada Tabel 2. Adapun Hasil simulasi ini memiliki rata-rata MSE error-x dan error-y dari keseluruhan hasilnya dari skenario 1 hingga 3, diperoleh hasil untuk error untuk H_p 50 H_c 10, yaitu 1.58×10^{-2} dengan waktu simulasi rata-rata 82.98333333 detik. Sedangkan untuk H_p 25 H_c 5, yaitu 1.07×10^{-2} . dengan waktu simulasi Rata-rata 90.43666667 detik.

Terlihat di sini untuk MPC dengan H_p 50 dan H_c 10, memiliki error yang besar. Akan tetapi memiliki waktu simulasi yang lebih cepat. Sedangkan MPC dengan H_p 25 dan H_c 5, memiliki error yang lebih kecil. Sama halnya, dilakukan pengujian tambahan, untuk melihat perubahan *steering*-nya lebih leluasa. Di mana MPC dengan H_p 50 dan H_c 10, memiliki error yang besar yaitu 9.46×10^{-2} . Begitu pula sebaliknya dengan MPC dengan H_p 50 dan H_c 10 memiliki error yang lebih kecil yaitu 6.77×10^{-2} . Meskipun demikian waktu simulasi dengan MPC H_p 50 dan H_c 10 lebih cepat dibanding dengan H_p 50 dan H_c 10.

Selain dilihat dari Parameter MPC, dari ketajaman belok juga mempengaruhi error dari trajektorinya. Belokan yang tajam cenderung memiliki error trajektori yang lebih besar. Contohnya, apabila dilihat dari MPC dengan H_p 25 dan H_c 5, terlihat error posisi x-nya lebih besar untuk skenario 1 (radius belokan kecil/belokan lebih tajam) yaitu di 9.81×10^{-3} sedangkan pada skenario 3 (radius belokan besar/belokan lebih tumpul) yaitu di 3.30×10^{-3} .

IV KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan kontroler multistage MPC dapat menangani variasi kecepatan longitudinal pada

kecepatan dan belokan jalan yang berbeda-beda. Hasil simulasi menunjukkan MPC dengan prediction dan control horizon tinggi, lebih cepat mencapai titik referensi akan tetapi tidak seakurat prediction dan control horizon rendah. Akan tetapi waktu simulasi lebih cepat dengan menggunakan MPC dengan prediction dan control horizon tinggi, dibandingkan yang rendah. Rata-rata prediciton horizon 50 dan control horizon 10, dan prediction horizon 25 dan control horizon 5, berturut-turut memiliki error sebesar 1.58×10^{-2} meter dan 1.07×10^{-2} meter dengan waktu simulasi berturut-turut, 82.98 detik dan 90.44 detik. Ketajaman belokan juga mempengaruhi error yang dihasilkan, di mana semakin tajam belokan maka error yang dihasilkan lebih besar.

Saran dari penelitian ini ke depannya, yaitu referensi trajektorinya dibuat *real-time*, yang sebelumnya berupa titik-titik referensi yang dibuat *offline*. Dan perlu penambahan state yang dimanipulasi, yaitu *yaw* sehingga perubahan *steering*-nya bisa lebih baik. Kontrolernya-pun bisa ditingkatkan lagi untuk *range* kecepatan yang lebih tinggi, salah satunya bisa dengan menggunakan nonlinear-MPC.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. P. Muthusamy, M. Rajendran, K. Ramesh, and P. Sivaprakash, "A review on road traffic accident and related factors," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 10, no. 11, pp. 28177–28183, 2015.
- [2] T. Giuffrè, S. Trubia, A. Canale, and A. Severino, "Automated Vehicle: a Review of Road Safety Implications as Driver of Change Intelligent Transportation Systems View Project Estimation of Road Safety using Traffic Microsimulation Model with Traditional and Autonomous Vehicles," *27th CARSP Conf. Toronto, ON, June 18-21, 2017*, no. June, 2017.
- [3] J. Lu, D. Filev, K. P. Asante, F. Tseng, and I. V. Kolmanovsky, "From vehicle stability control to intelligent personal minder: Real-time vehicle handling limit warning and driver style characterization," *2009 IEEE Work. Comput. Intell. Veh. Veh. Syst. CIVVS 2009 - Proc.*, pp. 43–50, 2009, doi: 10.1109/CIVVS.2009.4938722.
- [4] Y.-G. Xi, D.-W. Li, and S. Lin, "Model Predictive Control—Status and Challenges," *Acta Autom. Sin.*, vol. 39, no. 3, pp. 222–236, 2013, doi: 10.1016/s1874-1029(13)60024-5.
- [5] M. Abe, *Vehicle Dynamics and Control*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015.
- [6] B. Jacobson, *Vehicle dynamics*. New York: SAE International, 2015.
- [7] J. Hasmatha, M. Shivani, M. Manasa, and A. Chavan, "Steering control for autonomous vehicle using model predictive controller," *2020 IEEE Int. Conf. Innov. Technol. INOCON 2020*, pp. 1–5, 2020, doi: 10.1109/INOCON50539.2020.9298205.
- [8] E. W. Weisstein, "Wolfarm Notebook," "Curvature." Champaign: Wolfram MathWorld, 2022.
- [9] M. Schwenzer, M. Ay, T. Bergs, and D. Abel, "Review on model predictive control: an engineering perspective," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 117, no. 5–6, pp. 1327–1349, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07682-3.
- [10] O. Mikulas, "Quadratic programming algorithms for fast model-based predictive control," *Czech Tech. Univ. Prague Fac. Electr. Eng. Dep. Control Eng.*, no. May, pp. 1–63, 2013.