



Kontrol Pengikut Jalur untuk Sistem *Docking* pada *Autonomous Truck Trailer* Berbasis Kestabilan Lyapunov

Path-following control for docking system on autonomous truck trailer with the Lyapunov stability basis

M Afghan Fadhilah^{a,1}, Bani Asrofudin^{a,2}, M Raka Febsya P^{a,3}, Rizqy Ardhi^{a,4}, Augie Widyotiarmo^{a,5}

^a Institut Teknologi Bandung, Bandung 40132, Indonesia

¹ afghan13001@students.itb.ac.id; ² bani.asrofudin@students.itb.ac.id; ³ rakafp@students.itb.ac.id;
⁴ rizkyardhi@students.itb.ac.id; ⁵ Augie@tf.itb.ac.id

Abstrak. Aplikasi *autonomous truck trailer* telah dikembangkan pada dunia logistik pelabuhan guna meningkatkan efisiensi serta keselamatan kerja. Kontrol pada sistem *autonomous truck trailer* memiliki tingkat kesulitan yang sangat tinggi dikarenakan beberapa hal seperti sifat non-holomonik, efek *jack-kife* dan sifat *rigid* pada bagian *head* dan *trailer*. Telah dilakukan penelitian tentang kontrol *autonomous truck trailer* berbasis pengikut jalur yang menghasilkan tiga hal yaitu *stabilization*, *trajectory tracking*, dan *path following control*. Terdapat keterbatasan pada penelitian tersebut yaitu pada kondisi tidak terduga seperti sistem parkir, slip pada ban, dan penghindaran gangguan. Pada makalah ini disajikan sebuah kontrol pengikut jalur untuk sistem parkir bongkar muat (*docking*) pada *autonomous truck trailer* berbasis kestabilan Lyapunov. Fungsi pengontrol sudut kemudi dan kecepatan traksi diajukan sedemikian sehingga dapat menstabilisasi kesalahan dinamik sistem agar *truck trailer* bergerak berteepatan dengan jalur yang diinginkan. Pengontrolan sistem difokuskan pada *trailer* baik pada saat bergerak maju maupun mundur. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *autonomous truck trailer* dapat bergerak mengikuti pola yaitu dengan bergerak maju dan mundur untuk parkir menempati posisi untuk *docking*.

Kata Kunci: Kontrol pengikut jalur, *autonomous truck trailer*, sistem *docking*, kestabilan Lyapunov.

Abstract. The *autonomous truck trailer* application has been developed on the port logistic world to increase efficiency and work safety as well. The control on the autonomous system of truck trailer has a very high difficulty level caused by several aspects such as the non-holomonik property, the jack-kife effect, and the rigid characteristic of the head and trailer part. A study regarding the autonomous truck trailer control with path following basis which resulted three aspects which are stabilization, trajectory tracking, and path following control. There were limitations on the study which were on the unanticipated situations such as the parking system, slip on the tire, and obstacle avoidance. This study presented a path-following control system for docking parking system on autonomous truck trailer with Lyapunov Stability basis. The steering wheel control function and the traction velocity were submitted therefore can stabilize the error of the dynamical system in order for the truck trailer to move accordingly with the designated path. The system control was focused on the trailer both when moving forward and backwards. The simulation results showed that the autonomous truck trailer can move to follow patterns by moving forward and backwards to park and placing the position for docking.

Keywords: path following control, *autonomous truck trailer*, docking system, Lyapunov stability.

1 Pendahuluan

Pergudangan tidak terkecuali di pelabuhan, saat ini telah menerapkan *automated guided vehicle* (AGV) dengan tujuan untuk memudahkan operasional dan efisiensi kerja perusahaan. Aplikasi kontrol truk trailer *automatic* telah banyak diminati oleh industri logistik karena menawarkan

operasi tanpa awak yang memiliki berbagai macam kelebihan. Aplikasi kontrol truk trailer otomatis didesain untuk dapat bekerja secara optimal dengan cara meningkatkan *safety*, mengurangi kesalahan manusia, dan meningkatkan efektivitas kerja.

Sebagian besar industri telah menggunakan truk konvensional yang sudah dilengkapi dengan teknologi *drive by-wire* seperti *power steering electrohidrolic*, mesin transisi terkomputerisasi dan *electro-pnermuamtic breaking*. Keseluruhan sistem terintegrasi dalam sebuah sistem yang disebut *Electronic Control Unit* (ECU). Salah satu pergudangan yang menggunakan ECU adalah terminal peti kemas di Pelabuhan Tanjung Emas Semarang yang dikelola oleh PT PELINDO II. Untuk melakukan proses bongkar muat dari kapal kontainer ke pergudangan digunakan sebuah truk trailer yang telah dilengkapi dengan teknologi ECU. Oleh karena itu, *autonomous truck trailer* dapat dikembangkan dari manual menjadi otomatis.

Autonomous truck trailer terdiri dari dua bagian, yaitu bagian kepala truk (*head truck*) dan bagian karavan atau gerobak (*trailer*). *Head truck* adalah bagian depan truk di mana pusat pengaturan keseluruhan sistem berada, tempat mesin dioperasikan dan roda utama yang dikendalikan oleh sudut kemudi. Adapun *trailer* adalah gerobak/karavan dari truk yang biasanya sebagai tempat meletakkan beban seperti peti kemas dan lain sebagainya. Pengontrolan pada sistem *autonomous truck trailer* memiliki kesulitan yang sangat tinggi, hal ini dikarenakan kedua bagian truk tersebut bersifat *rigid*, serta kedua bagian dari truk tersebut merupakan *mobile robot* yang bersifat *non-holonomic*, keterbatasan sudut kemudi dan keterbatasan sudut pada titik sambung antara bagian *head truck* dan *trailer* yang dapat berpotensi menimbulkan efek *jack-knife* [1]. Efek *jack-knife* merupakan kondisi di mana sudut pada sambungan *head* dan *trailer* melebihi batas sehingga mengakibatkan tabrakan antara *head* dengan *trailer* atau *trailer* terguling akibat dorongan *backward*.

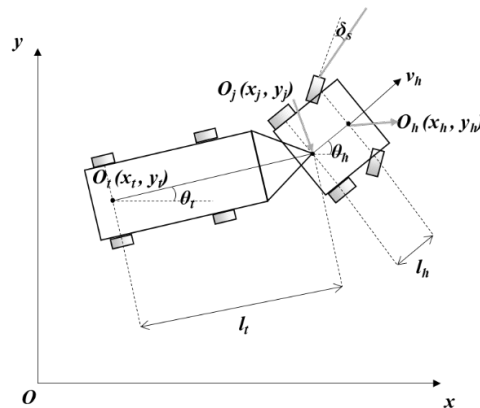
Telah dilakukan penelitian pada [2] tentang *line-following control of autonomous truck-trailer* yang menghasilkan tiga hal yaitu *stabilization*, *trajectory tracking* dan *path following control*. Penelitian tersebut menghasilkan suatu desain kontrol pada truk trailer otomatis dengan prinsip kerja robot penjejak garis. Namun, penelitian tersebut terbatas pada kondisi normal, yaitu tanpa mempertimbangkan kondisi yang tidak diharapkan seperti adanya gangguan pada jalur, slip antara ban dengan jalan dan sistem parkir.

Pada makalah ini dibahas *path following control* pada sistem parkir dengan gerakan maju dan mundur untuk proses *docking*. Adapun aplikasinya adalah saat *truck trailer* akan melakukan proses bongkar muat beban. Mula-mula truk dioperasikan maju mengikuti *path* yang telah ditentukan, kemudian setelah mencapai pada satu titik tertentu truk dioperasikan mundur untuk melakukan posisi parkir sesuai *path* untuk melakukan *docking*. Sistematika penulisan *paper* ini terbagi menjadi tiga bagian yaitu bagian pertama akan membahas tentang pemodelan sistem dan desain kontrol. Hasil simulasi akan dibahas pada bagian kedua. Kesimpulan dari makalah ini disajikan pada bagian ketiga.

2 Pengontrolan Autonomous Truck Trailer

2.1 Pemodelan Dinamik Truck Trailer

Truck trailer terdiri dari dua bagian yaitu bagian kepala truk (*head truck*) dan bagian karavan (*trailer*). Pemodelan dari *autonomous truck trailer* pada koordinat kartesian OXY digambarkan pada Gambar 1.



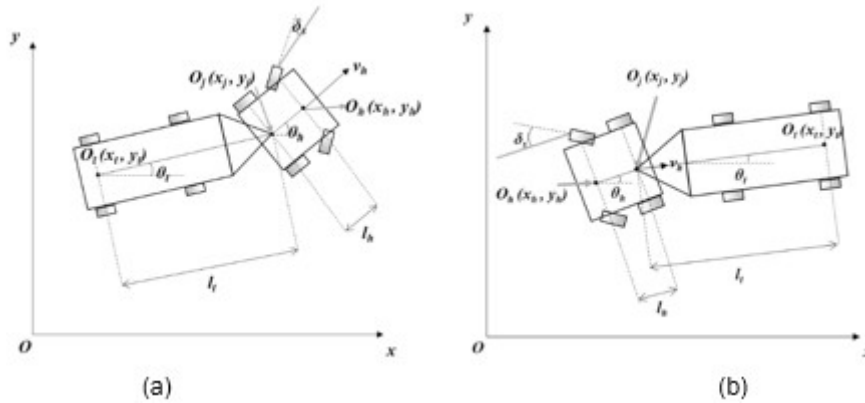
Gambar 1. Dinamika *Autonomous Truck Trailer*

Berdasarkan ilustrasi di atas dapat dilihat bahwa *truck trailer* memiliki dua bagian yaitu *head* dan *trailer* yang bersifat *rigid*. δ_s merupakan sudut kemudi yang menjadi salah satu masukan dari pengontrolan *truck trailer*, sedangkan v_h adalah kecepatan traksi yang juga merupakan masukan keduanya terletak pada bagian *head truck*. $O_h(x_h, y_h)$ merupakan bagian tengah dari poros roda kemudi. $O_j(x_j, y_j)$ adalah bagian tengah dari roda belakang *head truck* juga sekaligus menjadi titik sambung antara *head* dan *trailer*. θ_h merupakan sudut dari sumbu X ke Vector $O_j - \dot{O}_h$. $O_t(x_t, y_t)$ adalah bagian tengah dari roda belakang *trailer* sekaligus menjadi pusat pengontrolan dari *trailer*. θ_t merupakan sudut dari sumbu X ke Vector $O_t - \dot{O}_h$. l_h merupakan panjang antara titik tengah poros roda belakang *head truck* dengan titik tengah roda belakang *trailer*.

Penentuan lintasan dari *autonomous truck trailer* dibatasi oleh l_h dan l_t di mana keduanya akan menentukan radius jalur yang memungkinkan baginya untuk berjalan dalam lintasan lurus, berbelok, maupun melingkar baik saat bergerak maju maupun mundur. Dalam menentukan radius dalam lintasan, sistem dibagi menjadi tiga bagian masing-masing jari-jari rotasi *head* bagian depan, jari-jari rotasi titik sambung, dan jari-jari rotasi *trailer* bagian belakang. Oleh karena itu kinematika dari gerak *autonomous truck trailer* pada sistem parkir untuk proses *docking* terbagi menjadi kinematika gerak maju dan kinematika gerak mundur.

2.2 *Pemodelan Kinematik Truck Trailer*

Pemodelan kinematika *autonomous truck trailer* gerak maju dapat diilustrasikan pada Gambar 2 (a). Secara matematis dapat dituliskan dalam persamaan (1). Sedangkan Gambar 2 (b) merupakan kinematika gerak mundur. Secara matematis dapat dijabarkan dalam persamaan (2).



Gambar 2. Kinematika autonomous truck trailer (a) gerak maju, (b) gerak mundur

Berdasarkan kedua kinematik maju dan mundur di atas terlihat perbedaan bahwa pada bagian arah kecepatan traksi, di mana pada model kinematika gerak maju, kecepatan traksi, dan orientasi *truck trailer* memiliki arah yang sama. Di sisi lain pada model kinematika gerak mundur, kecepatan traksi dan orientasi *truck trailer* memiliki arah yang berlawanan.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{hf} \\ \dot{y}_{hf} \\ \dot{\theta}_{hf} \\ \dot{x}_{tf} \\ \dot{y}_{tf} \\ \dot{\theta}_{tf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{hf} \cos \theta_{hf} \\ v_{hf} \sin \theta_{hf} \\ \frac{v_{hf}}{l_h} \tan \delta_{sf} \\ v_{hf} \cos(\theta_{hf} - \theta_{tf}) \cos \theta_{tf} \\ v_{hf} \cos(\theta_{hf} - \theta_{tf}) \sin \theta_{tf} \\ \frac{v_{hf}}{l_t} \sin(\theta_{hf} - \theta_{tf}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{hb} \\ \dot{y}_{hb} \\ \dot{\theta}_{hb} \\ \dot{x}_{tb} \\ \dot{y}_{tb} \\ \dot{\theta}_{tb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{hb} \cos \theta_{hb} \\ v_{hb} \sin \theta_{hb} \\ \frac{v_{hb}}{l_h} \tan \delta_{sb} \\ v_{hb} \cos(\theta_{tb} - \theta_{hb}) \cos \theta_{tb} \\ v_{hb} \cos(\theta_{tb} - \theta_{hb}) \sin \theta_{tb} \\ - \frac{v_{hb}}{l_t} \sin(\theta_{tb} - \theta_{hb}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Kinematikan gerak maju dituliskan dengan persamaan berdasarkan ordinat OXY pada saat gerak maju di mana \dot{x}_{hf} adalah kecepatan *head truck* relatif terhadap sumbu X dan \dot{y}_{hf} adalah kecepatan *head truck* relatif terhadap sumbu Y keduanya dipengaruhi oleh v_{hf} dan θ_{hf} pada saat sistem bergerak maju. $\dot{\theta}_{hf}$ adalah kecepatan sudut *head truck* saat bergerak maju ditentukan oleh v_{hf} , sudut kemudi δ_{sf} dan panjang *head truck* l_h . \dot{x}_{tf} adalah kecepatan *trailer* relatif terhadap sumbu X dan \dot{y}_{tf} adalah kecepatan *trailer* relatif terhadap sumbu Y keduanya dipengaruhi oleh v_{hf} ,

θ_{hf} dan θ_{tf} pada saat sistem bergerak maju. $\dot{\theta}_{hf}$ adalah kecepatan sudut *trailer* saat bergerak maju ditentukan oleh v_{hf} , θ_{tf} , dan l_h .

Hampir sama dengan persamaan gerak maju, pada gerak mundur \dot{x}_{hb} adalah kecepatan head truck relatif terhadap sumbu X dan \dot{y}_{hf} adalah kecepatan *head truck* relatif terhadap sumbu Y keduanya dipengaruhi oleh v_{hb} dan θ_{hb} pada saat sistem bergerak mundur. $\dot{\theta}_{hb}$ adalah kecepatan sudut *head truck* saat bergerak mundur ditentukan oleh v_{hb} , sudut kemudi δ_{sb} dan panjang *head truck* l_h . \dot{x}_{tb} adalah kecepatan *trailer* relatif terhadap sumbu X dan \dot{y}_{tf} adalah kecepatan *trailer* relative terhadap sumbu Y keduanya dipengaruhi oleh v_{hf} , θ_{hf} dan θ_{tb} pada saat sistem bergerak mundur. $\dot{\theta}_{hb}$ adalah kecepatan sudut *trailer* saat bergerak maju ditentukan oleh v_{hf} , θ_{tf} , dan l_h perbedaannya pada kecepatan sudut *trailer* merupakan negasi atau bernilai negatif karena sistem berbalik arah.

2.3 Kestabilan Lyapunov

Metode Lyapunov digunakan untuk membuktikan kestabilan karena dapat menyelidiki kestabilan suatu sistem kontrol baik itu linear maupun non-linear yang tidak berubah terhadap waktu, pada sistem berorde rendah maupun berorde tinggi. Untuk sistem yang non-linear, metode Lyapunov hanya berlaku sifat non-linearitas tidak diskontinyu atau sistem dengan perubahan mendadak. Salah satu definisi kestabilan yang terkait dengan metode Lyapunov dapat ditinjau berdasarkan sistem yang didefinisikan dengan:

$$\dot{q} = f(q, t) \quad (3)$$

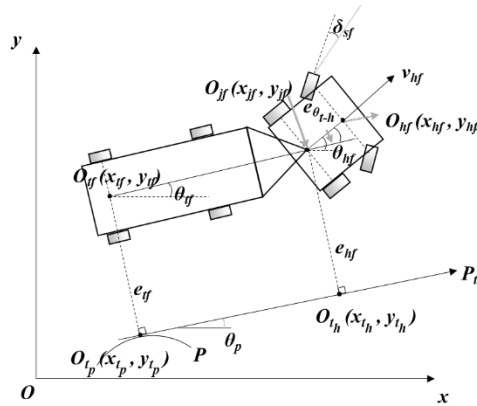
Persamaan di atas merupakan fungsi yang bergantung pada q dan t yang mempunyai penyelesaian bergantung pada kondisi awal. Pada penelitian kali ini, metode Lyapunov digunakan untuk mendesain kontrol pengikut jalur yang di dalamnya digunakan untuk menentukan perhitungan kestabilan origin dari kesalahan jarak, kesalahan orientasi, *steering control* dari *truck-trailer*. metode ini digunakan sedemikian rupa sehingga sistem dapat mencapai stabil asimtotik global.

2.4 Kontrol Pengikut Jalur

Pada makalah ini jalur ditentukan untuk parkir pada saat *truck trailer* melakukan proses *docking*. Jalur dirancang untuk *truck trailer* bergerak maju pada satu titik tertentu kemudian bergerak mundur untuk masuk ke dalam slot parkir yang tersedia. Oleh karena itu sistem gerak *truck trailer* dibagi menjadi dua kondisi yaitu kondisi gerak maju dan gerak mundur.

2.4.1 Kontrol kemudi gerak maju

Skema dari kontrol pengikut jalur untuk gerak maju dapat diilustrasikan seperti Gambar 3.



Gambar 3. Pengontrolan gerak maju *autonomous truck trailer*

Jalur yang akan diikuti adalah digambarkan dengan kurva P (lihat Gambar 3). Panjang dari $O_{th}-O_j$ dilambangkan sebagai e_{hf} yang merupakan kesalahan dari posisi head truck terhadap jalur kurva tangen P_t . Panjang dari $O_{tp}-O_t$ merupakan kesalahan posisi *trailer* terhadap lintasan p didefinisikan sebagai e_{rf} . Sudut dari sumbu x terhadap jalur kurva tangen P_t didefinisikan sebagai θ_p . Vektor jalur kurva tangen P_t yang merupakan garis singgung P di mana terdapat titik O_{tp} pada P_t dan P sedemikian sehingga vektor $O_{tp}-O_j$ tegak lurus dengan P_t . Perbedaan sudut antara *head truck* dan jalur kurva tangen didefinisikan oleh $e_{\theta_f,h-p} = \theta_{hf} - \theta_p$. Dalam selang waktu yang singkat, θ_p tidak berubah terhadap waktu atau bernilai konstan sehingga besarnya $\dot{e}_{\theta_f,h-p} = \dot{\theta}_{hf} - \dot{\theta}_p$ akan setara dengan $\dot{e}_{\theta_f,h-p} = \dot{\theta}_{hf}$.

Tujuan dari kontrol pengikut jalur sistem *truck trailer* adalah untuk mengonfigurasi *head truck* dan *trailer* agar tepat berada pada jalur kurva tangen P_t , artinya kondisi kesalahan dinamik sistem bernilai nol. Hal ini dapat dicapai dengan membuat kesalahan $[e_{hf}, e_{\theta_f,h-p}]^T$. Kesalahan dinamik dari sistem *autonomous truck trailer* secara matematis diturunkan dalam persamaan (4).

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{hf} \\ \dot{e}_{\theta_f,h-p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{hf} \sin e_{\theta_f,h-p} \\ \frac{v_{hf}}{l_h} \tan \delta_{sf} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Asumsikan bahwa kecepatan traksi bernilai positif $v_{hf} = v_{hf+i>0i}$, maka:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{hf} \\ \dot{e}_{\theta_f,h-p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{hf+} \sin e_{\theta_f,h-p} \\ \frac{v_{hf+}}{l_h} \tan \delta_{sf} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Sistem akan dikontrol dengan metode Kestabilian Lyapunov yang, maka dilakukan pencarian derivatif pertama fungsi kuadrat Lyapunov V_3 secara matematis pada persamaan (5). Selanjutnya akan diperoleh suatu fungsi pengontrolan δ_{sf} pada persamaan (6) yang akan membuat e_{hf} dan $e_{\theta_f,h-p}$ bernilai nol.

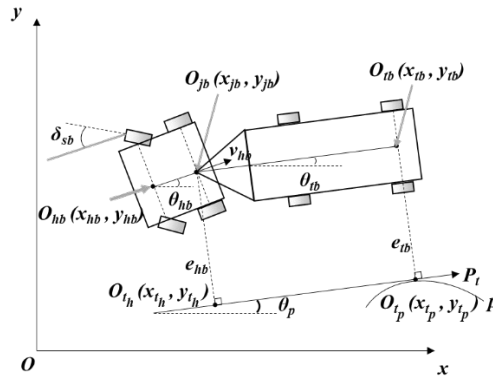
$$V_3 = \frac{1}{2} e_{hf}^2 + \frac{1}{2} e_{\theta f, h-p}^2 \quad (6)$$

$$\delta_{sf} = - \tan^{-1} \left[\frac{l_h}{v_{hf+}} \left(K_{\theta f, h-p} e_{\theta f, h-p} + e_{hf} v_{hf+} \frac{\sin e_{\theta f, h-p}}{e_{\theta f, h-p}} \right) \right] \quad (7)$$

Suatu fungsi V_3 kandidat definit positif Lyapunov, akan diperoleh turunan pertama yang bernilai negatif semi-definit. Dengan $K_{\theta f, h-p}$ adalah suatu konstanta yang bernilai positif sehingga sedemikian sehingga $(e_{hf}, e_{\theta f, h-p}) \rightarrow 0$ ketika waktu $t \rightarrow \infty$.

2.4.2 Kontrol kemudi gerak mundur

Skema dari kontrol pengikut jalur untuk gerak maju dapat diilustrasikan seperti Gambar 4.



Gambar 4. Pengontrolan Gerak Mundur *Autonomous Truck Trailer*

Secara umum konfigurasi pengontrol gerak mundur sama dengan gerak maju. perbedaan sudut antara head-truck dan jalur kurva tangen didefinisikan oleh $e_{\theta b, h-p} = \theta_{hb} - \theta_p$. Pada selang waktu yang singkat θ_p tidak berubah terhadap waktu atau bernilai konstan sehingga besarnya $\dot{e}_{\theta b, h-p} = \dot{\theta}_{hb} - \dot{\theta}_p$ akan setara dengan $\dot{e}_{\theta, h-p} = \dot{\theta}_{hb}$. Perbedaan sudut antara head truck dengan trailer disimbolkan sebagai $e_{\theta, t-h}$.

Tujuan dari kontrol pengikut jalur sistem *truck-trailer* yang bergerak mundur adalah untuk mengonfigurasi *head truck* dan *trailer* agar tepat berada pada jalur kurva tangen p_t . Pada

kondisi gerak mundur tercapai saat $[e_{hb}, e_{\theta b, h-p}]^T = 0$. Kesalahan dinamik dari sistem *autonomous truck trailer* yang berjalan mundur dapat direpresentasikan secara matematis dengan menganalisisnya ke dalam turunannya terhadap waktu sesuai persamaan (7).

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{hb} \\ \dot{e}_{\theta b, h-p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_{hb} \cos e_{\theta, t-h} \sin e_{\theta b, h-p} \\ -\frac{v_{hb}}{l_h} \tan \delta_{sb} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Desain dari kontrol pengikut jalur untuk gerak mundur untuk pengontrolan berfokus pada *head truck* dapat dimulai dengan derivatif dari orientasi kontrol *head truck* serta perbedaan sudut antara jalur tangen kurva p_t dengan *head truck* dengan mendefinisikan variabel baru berupa ϑ di mana $\vartheta = \cos e_{\theta,t-h}$. Oleh sebab itu, dilakukan observasi menjadi persamaan (8).

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{hb} \\ \dot{e}_{\theta b,h-p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_{hb}\vartheta \sin e_{\theta b,h-p} \\ -\frac{v_{hb}}{l_h} \tan \delta_{sb} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Selanjutnya sistem akan dikontrol dengan metode kestabilan Lyapunov hingga didapatkan persamaan yang membawa V menuju nol. Selanjutnya akan diperoleh suatu fungsi pengontrolan δ_{sb} yang dapat membuat e_{hb} dan $e_{\theta b,h-p}$ bernilai nol dengan mencari derivatif turunan pertama fungsi kandidat Lyapunov. Fungsi kandidat definit positif Lyapunov diajukan dalam bentuk persamaan (9).

$$V_6 = \frac{1}{2}e_{hb}^2 + \frac{1}{2}e_{\theta b,h-p}^2 \quad (10)$$

Untuk membuat kesalahan dinamik dari sistem autonomous truck trailer yang berjalan mundur mencapai kestabilannya yang dicapai dengan membuat kesalahan posisi head truck terhadap jalur kurva tangen P_t yaitu e_{hb} dan perbedaan sudut antara head truck dan jalur kurva tangen, $e_{\theta b,h-p}$ bernilai nol, diperlukan fungsi pengontrolan δ_{sb} yang dapat membuat e_{hb} dan $e_{\theta b,h-p}$ bernilai nol dengan mencari derivatif turunan pertama fungsi kandidat Lyapunov sebagai berikut.

$$\delta_{sb} = -\tan^{-1} \left[\frac{l_h}{v_{hb}} \left(K_{\theta b,h-p} e_{\theta b,h-p} + e_{hb} v_{hb} \vartheta \frac{\sin e_{\theta b,h-p}}{e_{\theta b,h-p}} \right) \right] \quad (11)$$

Yang merupakan desain pengontrolan sudut kemudi maka suatu fungsi V_a kandidat definit positif Lyapunov, akan diperoleh turunan pertama yang bernilai negatif semi-definit. Dengan $K_{\theta b,h-p}$ adalah suatu konstanta yang bernilai positif sehingga sistem dapat mencapai kestabilan ketika waktu t menuju tak hingga.

2.4.3 Kontrol kecepatan gerak maju

Selain sudut kemudi, kecepatan truk juga merupakan masukan dari sistem *autonomous truck trailer* yang perlu dikontrol sedemikian. Secara umum kecepatan traksi akan mencapai batas maksimum saat kondisi *truck trailer* tepat berada di jalur yang telah ditentukan yaitu kurva tangen p_t dan orientasi *head* dan *trailer* searah dengan jalur tangen kurva. Dikarenakan sistem parkir menggunakan gerak maju dan gerak mundur, maka kecepatan traksi dibagi menjadi dua bagian yaitu kecepatan traksi saat gerak maju v_{hf} dan kecepatan traksi saat gerak mundur v_{hb} .

Kecepatan traksi saat gerak maju v_{hf} bernilai positif dan bergantung pada posisi dari *truck trailer* terhadap jalur yang ditetapkan. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$v_{hf} = \frac{v_{hf \max}}{1 + K_{vf,eh} |e_{hf}| + K_{vf,\theta hp} |e_{\theta f, h-p}|} \quad (12)$$

Di mana $v_{h \max}$ merupakan kecepatan traksi maksimal, $K_{vf,eh}$, $K_{vf,\theta hp}$, $K_{vf,et}$, $K_{vf,\theta tp}$ dan $K_{vf,\theta ht}$ bernilai konstan positif yang merupakan parameter untuk mengatur kecepatan traksi dengan memilih variabel yang dominan untuk mengoptimasi performa tersebut. Kecepatan traksi akan mencapai titik maksimum ketika kondisi dan orientasi *truck trailer* berada tepat di jalur yang ditetapkan. Kecepatan akan mengalami penurunan ketika kondisi dan orientasi *truck trailer* berada tidak bertepatan dengan jalur yang ditetapkan. Kecepatan traksi akan bernilai maksimum saat e_{tf} , $e_{\theta f, t-p}$, $e_{\theta, h-t}$ bernilai nol.

2.4.4 Kontrol kecepatan gerak mundur

Kecepatan traksi saat gerak mundur v_{hb} bernilai negatif dan bergantung pada posisi dari truck trailer terhadap jalur yang ditetapkan. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

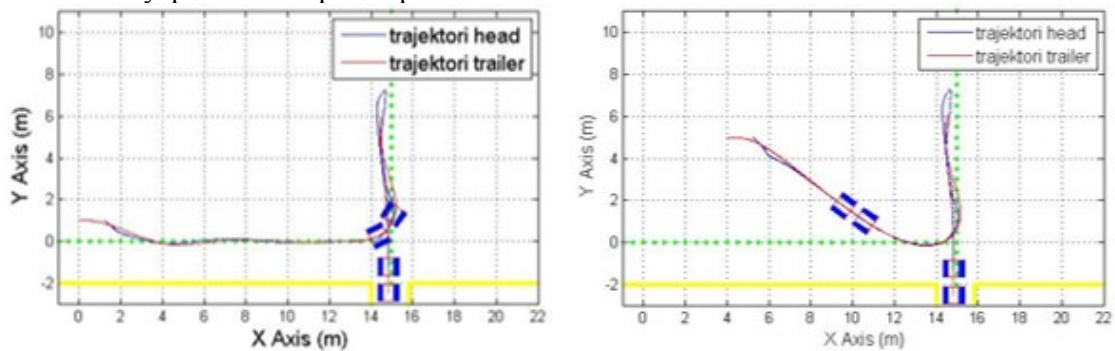
$$v_{hb} = \frac{-v_{hb \max}}{1 + K_{vb,eh} |e_{hb}| + K_{vb,\theta hp} |e_{\theta b, h-p}|} \quad (13)$$

Di mana $v_{h \max}$ merupakan kecepatan traksi maksimal, $K_{vb,eh}$, $K_{vb,\theta hp}$, $K_{vb,et}$, $K_{vb,\theta tp}$ dan $K_{vb,\theta ht}$ bernilai konstan positif yang merupakan parameter untuk mengatur kecepatan traksi dengan memilih variabel yang dominan untuk mengoptimasi performa tersebut. Sama dengan gerak maju, kecepatan traksi akan mencapai titik maksimum ketika kondisi dan orientasi *truck trailer* berada tepat di jalur yang ditetapkan. Kecepatan akan mengalami penurunan ketika kondisi dan orientasi *truck trailer* berada tidak bertepatan dengan jalur yang ditetapkan.

Kecepatan traksi akan bernilai maksimum saat e_{tf} , $e_{\theta f, t-p}$, $e_{\theta, h-t}$ bernilai nol.

3 Hasil dan Analisis

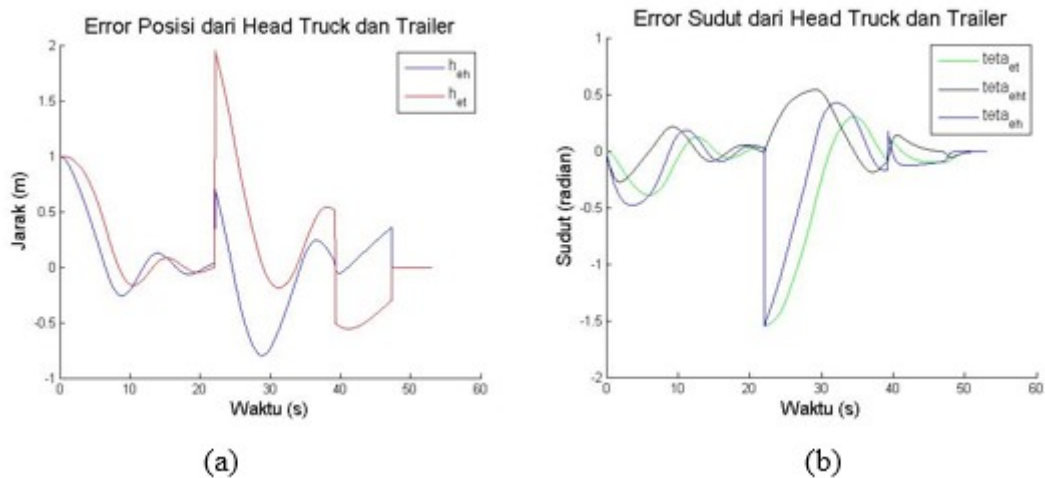
Bagian ini akan menjelaskan tentang hasil simulasi kontrol pengikut jalur untuk sistem parkir bongkar muat *autonomous truck trailer* yang dilakukan pada Matlab untuk melihat respon fungsi pengontrolan yang telah diusulkan sebelumnya. Hasil simulasi untuk perancangan kontrol pengikut jalur untuk sistem parkir bongkar muat pada *autonomous truck trailer* berbasis Kestabilan Lyapunov ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil simulasi (a) *Initial Position* $x(1)=0$, $y(1)=1$ & sudut orientasi $\theta_h = \theta_t = 0$ *Initial Position* $x(1)=4$, $y(1)=5$ & sudut orientasinya $\theta_h = \theta_t = 0$

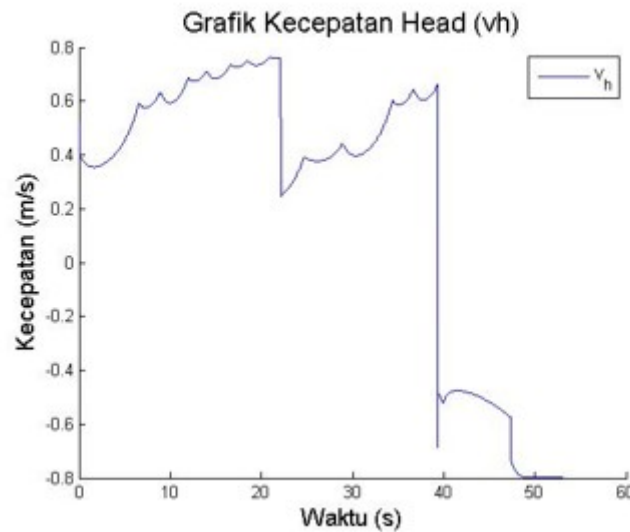
Dari hasil simulasi pada Gambar 5 terlihat bahwa gerakan pertama yang dilakukan pada proses *docking* yaitu gerakan maju. Kemudian dilakukan pengontrolan dengan membuat suatu aturan kontrol kapan sistem akan berbelok menjauhi slot parkir untuk memposisikan trailer sejajar dengan slot parkir. Selanjutnya sistem dikontrol untuk pada titik tertentu melakukan gerakan mundur agar *truck trailer* memasuki slot parkir yang tersedia.

Pada simulasi matlab juga ditampilkan grafik error posisi dan error sudut dari *truck trailer* untuk mengetahui respon kesalahan posisi dan kesalahan sudut dari *head truck* terhadap *path* ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6. (a) Error Posisi dari *Head Truck* dan *Trailer*. (b) Error Sudut dari *Head Truck* dan *Trailer*

Gambar 6 merupakan hasil simulasi grafik kesalahan jarak *autonomous truck trailer* terhadap jalur yang diinginkan saat *truck-trailer* bergerak maju dan mundur mengikuti *path*. Grafik kesalahan posisi dinyatakan dalam satuan meter. Pada Gambar 6(a) dan Gambar 6(b) yaitu masing-masing ditunjukkan respon kesalahan posisi bagian *head truck* terhadap *path* (e_h) dan respon kesalahan sudut *trailer* terhadap *path* ($e_{\theta,t-p}$), kesalahan sudut *head* terhadap *path* ($e_{\theta,h-p}$), dan selisih sudut antara *head truck* dan *trailer* terhadap waktu ($e_{\theta,h-t}$). Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain pengontrol baik saat maju maupun mundur menghasilkan profil kesalahan posisi yang dapat konvergen menuju nol.



Gambar 7. Grafik Kecepatan Traksi (v_h)

Gambar 7 menunjukkan grafik kecepatan *head truck* (v_h) dari hasil simulasi Matlab *autonomous truck trailer*. Besarnya kecepatan *head truck* dinyatakan dalam satuan m/s. Kecepatan maksimum dari *head truck* diasumsikan sebesar 0,8 m/s saat berjalan maju atau -0,8 m/s saat berjalan mundur yang dapat dicapai ketika *autonomous truck trailer* telah mengikuti lintasan yang diinginkan dengan stabil. Dengan demikian berarti keseluruhan kesalahan baik kesalahan sudut dan posisi telah bernilai nol. Kecepatan akan menurun ketika *truck-trailer* berada pada posisi yang cukup jauh dengan konfigurasi jalur yang diinginkan, sebaliknya kecepatan akan meningkat ketika ketika posisi *autonomous truck trailer* sudah memiliki orientasi sudut dan posisi yang sesuai.

4 Kesimpulan

Makalah ini menyajikan perancangan sistem kontrol pada *autonomous truck trailer* untuk proses parkir bongkar muat (*docking*) berbasis kestabilan Lyapunov. Perancangan telah berhasil dilakukan dengan diterapkan *path following control* pada sistem parkir dengan gerakan *forward* dan *backward* untuk proses bongkar muat beban (*docking*). Masukan dari sistem berupa sudut kemudi dari roda kemudi dan kecepatan traksi yang berada di *head truck*. Berdasarkan hasil percobaan diketahui bahwa kecepatan traksi dipengaruhi oleh posisi *truck trailer* terhadap jalur yang telah ditentukan. Kecepatan akan mencapai titik maksimum jika posisi dan orientasi *truck trailer* searah dengan jalur dan kecepatan menurun pada kondisi sebaliknya.

Adapun aplikasi dari sistem parkir adalah saat *truck trailer* akan melakukan bongkar muat peti kemas (*docking*). Mula-mula truk dioperasikan untuk bergerak maju mengikuti *path* yang telah ditentukan. Kemudian setelah mencapai pada suatu titik tertentu truk dioperasikan bergerak mundur untuk melakukan posisi parkir sesuai *path* untuk melakukan *docking* pada slot parkir yang ditentukan.

Referensi

- [1] A. Widyotriatmo, *Orienting Head-Truck in the Design of Truck-Trailer Path Following Control*, in Proc. of the 2018 International Conference on Control, Automation, and Systems, 2018
- [2] A. Widyotriatmo, P. I. Siregar and Y. Y. Nazarrudin, *Line Following Control of an Autonomous Truck Trailer*, International Conference on Robotics, Biomimetics, and Intelligente Computational Systems (Robionetics), pp. 24-28, 2017
- [3] A. Widyotriatmo, A.K. Pamosoaji, K.S. Hong, *Control Architecture of an Autonomous Material Handling Vehicle*, International Journal of Artificial Intelligent, Vol. 10, no 13S, pp. 139-153, 2013.
- [4] J. David and P. V. Manivannan, *Control of truck-trailer mobile robots: a survey*, Intelligent Service Robotics, vol. 7, pp. 245258, 2014
- [5] M. Yue, X. Hou, R. Gao and J. Chen, *Trajectory Tracking Control for Tractor-Trailer Vehicles: a Coordinated Control Approach*, in Nonlinear Dynamics, Vol. 91, No. 2, pp. 1061-1074, 2018
- [6] J. Cheng, Y. Zhang and Z. Wang, *Backward Tracking Control of Mobile Robot with One Trailer via Fuzzy Line-of-Sight Method*, in International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009.