



P-ISSN : 2622-1276
E-ISSN: 2622-1284

The 7th Conference on Innovation and Application of Science and Technology (CIASTECH)

Website Ciastech 2024 : <https://ciastech.net>
Open Conference Systems : <https://ocs.ciastech.net>
Proceeding homepage : <https://ciastech.net>

PEMODELAN ROAD FEELING PADA KENDARAAN YANG MENGGUNAKAN STEER BY WIRE SYSTEM

Fachrudin Hunaini^{1*)}, Gigih Priyandoko²⁾, Gatot Subiyakto³⁾, Purbo Suwandono⁴⁾

^{1, 2)} Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Widyagama Malang

^{3, 4)} Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Widyagama Malang

INFORMASI ARTIKEL

Data Artikel :

Naskah masuk, 2 Oktober 2024
Direvisi, 2 Oktober 2024
Diterima, 2 Oktober 2024

Email Korespondensi :

fachrudin_h@widyagama.ac.id

ABSTRAK

Sistem kontrol optimal untuk *road feeling* pada sistem SbW bertujuan untuk meningkatkan respon pengemudi dengan memberikan umpan balik torsi yang akurat. Hal ini diperlukan untuk memberikan efek rasa yang ditimbulkan oleh kondisi jalan dan memberi torsi lawan sebagai umpan balik ke tangan pengemudi tentang pergerakan kendaraan dan informasi permukaan jalan. Sistem kontrol *Fuzzy Logic* dibangun untuk mengendalikan sistem umpan balik *road feeling* pada sebuah sistem SbW. Input pada *Fuzzy Logic Control* terdiri dari kecepatan kendaraan, sudut kemudi, rasio kemudi, serta torsi inersia dan gesekan dalam menghasilkan torsi kemudi. Parameter FLC dioptimalkan menggunakan MQPSO untuk mencapai respon torsi *road feeling* yang optimal. Model Simulink dikembangkan untuk mensimulasikan sistem ini, dan hasilnya menunjukkan peningkatan kinerja FLC yang optimal dalam mengontrol umpan balik torsi motor kemudi. Paper ini berkontribusi pada bidang teknologi *steer-by-wire* dengan mengusulkan model kontrol torsi yang optimal, serta memberikan wawasan tentang peran FLC dan MQPSO dalam meningkatkan dinamika *road feeling*.

Kata Kunci : *Road Feeling* , *Fuzzy Logic Control*, *MQPSO*, *Steer by Wire*

1. PENDAHULUAN

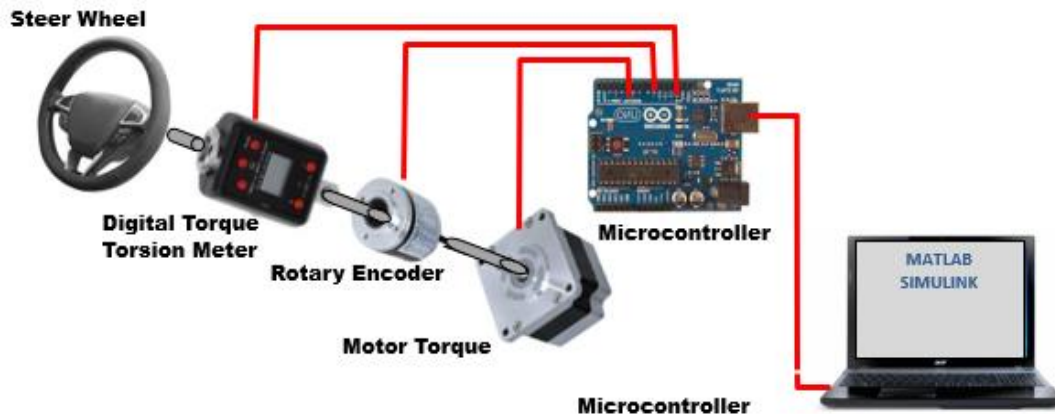
Steer by wire (SbW) system adalah bagian dari teknologi *Drive by Wire* dimana penghubung mekanis konvensional antara kemudi dan roda depan diganti dengan aktuator elektronik sehingga putaran kemudi (*Steer*) menjadi sangat ringan [1], [2]. Untuk itu pengemudi memerlukan efek rasa perubahan informasi jalan berupa umpan balik *road feel* ke tangan pengemudi tentang pergerakan kendaraan dan informasi permukaan jalan tanpa menimbulkan masalah kenyamanan [3], [4]. Riset yang telah dilakukan adalah simulasi kontrol *road feeling* menggunakan algoritma matematis yang

dipengaruhi oleh kecepatan input, sudut roda depan, kecepatan, torsi dan sudut roda kemudi untuk mendapatkan karakteristik *road feeling* yang diinginkan [1], [5], [6], [7]. *Fuzzy Logic Control* (FLC) merupakan aplikasi AI yang handal untuk mengendalikan sistem yang nonlinier namun memiliki kesulitan dalam memperoleh parameter yang dibutuhkan. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode untuk menala parameter-parameter FLC [8], [9]. *Particle Swarm Optimization* (PSO) adalah metode optimisasi berbasis perilaku yang sederhana dan cepat mencapai konvergensi [2], [10] dengan menirukan perilaku sosial makhluk hidup, seperti sekawanan burung maupun ikan. Dalam upaya untuk lebih menjamin tercapainya *global optimal*, suatu inovasi berdasarkan mekanika kuantum yang selanjutnya metode ini disebut *Quantum behaved Particle Swarm Optimization* (QPSO) [11], [12]. Namun selanjutnya untuk lebih menjamin tercapainya *global convergence* yang lebih akurat dan metode ini dimodifikasi menjadi *Modified-Quantum Particle Swarm Optimization* (MQPSO) [10].

Berdasarkan uraian di atas maka dirancang sistem kontrol torsi lawan pada kemudi kendaraan yang menggunakan SbW sehingga menghasilkan efek *road feeling* atau nuansa kemudi buatan pada sistem SbW menggunakan FLC yang dioptimisasi menggunakan MQPSO dan diuji melalui simulasi *Software In the Loop Simulations* (SILS).

2. PEMODELAN SISTEM KONTROL FLC

Perancangan sistem kontrol *road feeling* pada SbW system menggunakan FLC dengan aplikasi Matlab Simulink. Struktur Sistem kontrol terdiri dari input berupa; kecepatan kendaraan dan sudut roda kemudi; dan output berupa arus motor untuk torsi roda kemudi seperti pada ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Model sistem kontrol rig *road feeling* pada *steer by wire*

2.1. Input Sistem Kontrol

Input kemudi (*steering input*) merupakan hubungan matematis antara kecepatan kendaraan (V), sudut *steer* roda kemudi (θ_s), sudut *steer* roda depan (θ_ω) dan *Steer Ratio* (SR) sebagai rasio antara sudut putar roda kemudi dengan sudut putar roda depan [13]. Pada kecepatan rendah, rasio kemudi adalah rendah yang memberikan sudut *steer* yang lebih besar, sementara pada kecepatan tinggi, rasio kemudi adalah tinggi yang memberikan sudut *steer* yang lebih kecil untuk meningkatkan stabilitas

kendaraan. *Steering Rasio* yang digunakan adalah dipilih SR yang sederhana yaitu dengan karakteristik linier [14]:

$$SR(V) = aV + b \quad (1)$$

$$\theta_{\omega} = \frac{\theta_s}{SR(V)} \quad (2)$$

a. Model Torsi Inersia:

Torsi inersia mencerminkan resistensi terhadap perubahan rotasi pada sistem kendaraan,

$$T_{inertia} = I \cdot \frac{d^2 \theta_w}{dt^2} \quad (3)$$

di mana (I) adalah momen inersia dan percepatan sudut yang merupakan *derivative* ke dua dari sudut roda. Torsi ini berperan penting dalam menentukan seberapa cepat kendaraan dapat berakselerasi atau melambat [15].

b. Model Torsi Gesek

Torsi gesekan dihasilkan dari interaksi antara ban dan permukaan jalan, yang melawan gerakan kendaraan. Torsi ini dapat dihitung dari gaya gesekan *lateral* [16]:

$$T_{friction} = f_{lateral} \cdot r_w \quad (4)$$

di mana $f_{lateral}$ adalah gaya gesekan yang bergantung pada koefisien gesek dan gaya normal, dan r_w adalah jari-jari roda. Torsi gesekan menjadi faktor penting dalam stabilitas dan kontrol kendaraan.

c. Torsi Jalan

Torsi jalan mencerminkan pengaruh dari gaya resistif yang bekerja pada kendaraan akibat interaksi dengan jalan. Torsi ini sering kali dianggap sebagai torsi yang harus diatasi oleh sistem penggerak kendaraan. Penyederhanaan model matematisnya [17] dinyatakan sebagai:

$$T_{road} = K_{road} \cdot \theta_w \quad (5)$$

di mana K_{road} adalah konstanta yang representatif untuk kondisi jalan dan karakteristik ban.

Secara keseluruhan, total torsi yang diperlukan dalam sistem kendaraan dapat dinyatakan sebagai:

$$T_{total} = T_{inertia} + T_{friction} + T_{road} \quad (6)$$

$$T_{total} = I \cdot \ddot{\theta}_w + f_{lateral} \cdot r_w + K_{road} \cdot \theta_w \quad (7)$$

Model ini membantu dalam menganalisis performa kendaraan dalam berbagai kondisi operasional, serta dalam merancang sistem kontrol yang efektif.

di mana:

- $f_{lateral}$ adalah koefisien gesekan,
- I adalah inersia sistem kemudi,
- $\ddot{\theta}_w$ adalah percepatan sudut roda,
- $\dot{\theta}_w$ adalah kecepatan sudut roda,
- θ_w adalah sudut roda.

Inersia dan gaya gesek memberikan kontribusi pada torsi yang dibutuhkan untuk memutar roda, sedangkan torsi dari jalan mempengaruhi umpan balik yang dirasakan oleh pengemudi. Torsi total yang menjadi input untuk FLC adalah kombinasi dari berbagai kontribusi tersebut.

2.2. Output Sistem Kontrol

Torsi Motor sebagai output FLC dirancang untuk membangkitkan torsi motor yang berfungsi sebagai torsi umpan balik kepada pengemudi yang biasanya dirasakan pengemudi melalui koneksi mekanis. Tujuannya adalah untuk menghasilkan torsi motor yang menyerupai efek rasa jalan secara alami.

Motor DC adalah motor yang digunakan dinyatakan dalam bentuk *Transfer Function* (TF) yang diperoleh dari uji karakteristik motor DC. Hubungan antara torsi motor dan konstanta torsi motor dalam motor DC disederhanakan [18] seperti berikut:

$$T_{motor} = K_T \cdot I_m \quad (8)$$

di mana:

T_{motor} adalah Torsi motor

K_T adalah konstanta Torsi motor (Nm/A)

I_m adalah arus yang melalui motor.

2.3. Perancangan Sistem Optimisasi Sistem Kontrol FLC

Modified Quantum Particle Swarm Optimization (MQPSO) digunakan untuk mengoptimalkan parameter fungsi keanggotaan FLC agar sistem dapat mencapai kinerja optimal dalam meminimalkan kesalahan antara torsi umpan balik yang diinginkan dan aktual. Algoritma MQPSO memperkenalkan prinsip-prinsip kuantum untuk meningkatkan kemampuan pencarian *global* dari PSO tradisional. Partikel-partikel dalam MQPSO mengikuti perilaku kuantum, yang membantu menghindari *local minima* dan mempercepat konvergensi dibanding dengan PSO maupun QPSO [19], [20].

Perancangan sistem optimasi untuk menentukan parameter-parameter sistem kontrol FLC yang optimal adalah melalui pembelajaran dengan menggunakan algoritma MQPSO. Metode MQPSO digunakan untuk menentukan populasi awal partikel secara acak dan kemudian dievaluasi pada model kendaraan. Populasi partikel kemudian disebut sebagai *swarm*, yang terdiri 3 parameter sistem kontrol untuk menentukan posisi dan lebar *Membership Function* (MF) yaitu ΔER , ΔDE , ΔOT . Selanjutnya partikel akan dievaluasi dan diperbarui kembali sampai iterasi maksimum. Selama proses iterasi berlangsung terjadi perubahan *error* hingga mencapai konvergen, dengan kata lain, posisi partikel telah mencapai posisi terbaik yang berarti telah mencapai nilai optimal atau sistem kontrol telah dapat bekerja secara optimal [20].

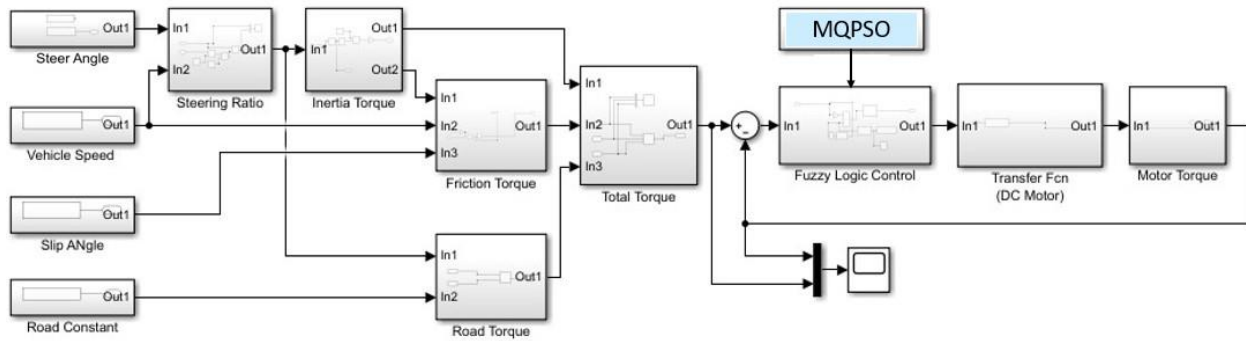
$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1(pbest_i - x_i(t)) + c_2r_2(pbest_i - x_i(t)) \quad (9)$$

$$x_i(t+1) = p_i \pm \alpha |gbest - x_i(t)| * \ln(1/u) \quad u \sim U(0,1) \quad (10)$$

$$p_i = \beta \times pbest_i + (1 - \beta) \times gbest_i \quad (11)$$

3. HASIL PENGUJIAN SOFTWARE-IN-THE-LOOP-SIMULATION (SILS)

Simulasi menggunakan MATLAB Simulink dengan variable pengujian, yaitu tikungan *Sine Wave* dan variasi kecepatan kendaraan.



Gambar 2. Struktur Sistem Kontrol Road Feeling FLC-MQPSO

Hasil uji SILS sistem kendali optimal FLC-MQPSO diperoleh nilai konvergensi, *fitness* terbaik, tiga nilai parameter FLC optimal dan *error* C-RMS adalah:

MQPSO mencapai konvergensi pada iterasi ke-6.

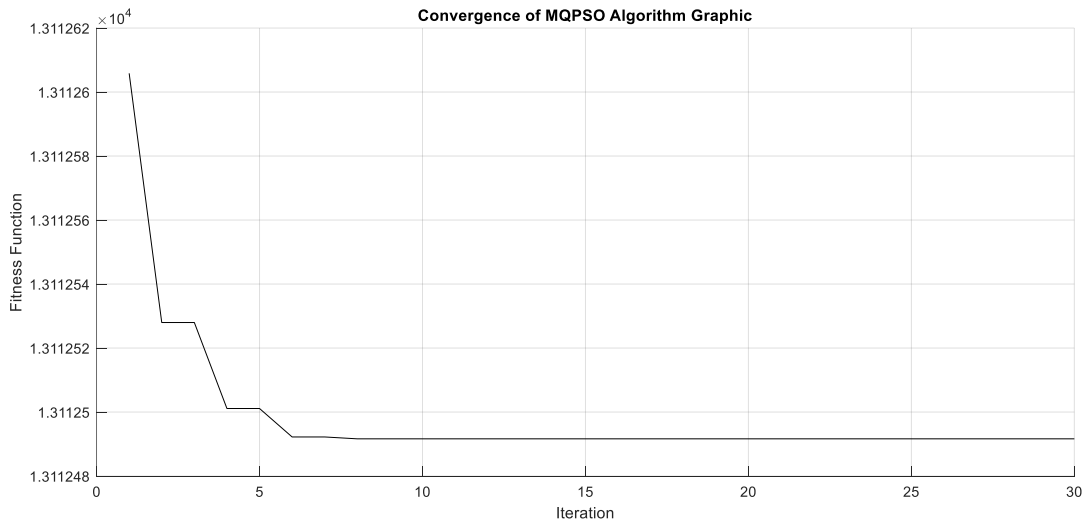
Fitness Function: 13112e+04 (ITAE)

kesalahan kinerja sistem kendali optimal dinyatakan dalam kesalahan C-RMS sebesar 0,000999.

Faktor Pengali untuk MF:

- *Error* (ER) = 7.802928688626110
- *Delta Error* (DE) = 2.571552150733341
- *Output* (OT) = 5.241155929013686

Grafik Konvergensi proses optimisasi sistem control FLC menggunakan MQPSO

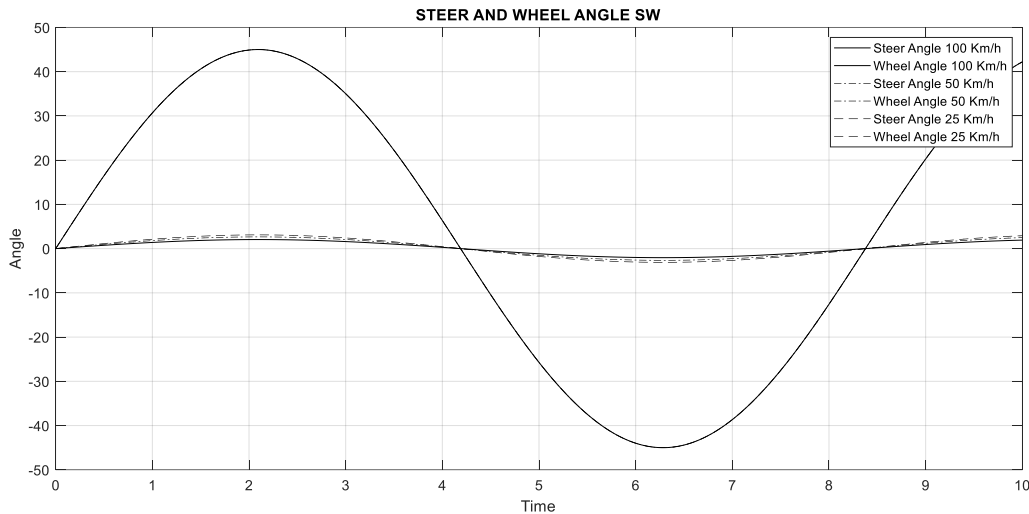


Gambar 3. Konvergensi Optimisasi FLC-MQPSO

Variable input pengujian terdiri dari:

- *Steering Ratio Linier*: $SR(V) = 0.1V + 12$
- *Constant Slip Angle* (0.05)
- *Coefisien Road Friction* (0.9)

Input sistem kontrol berupa *Continues Steer Angle* dalam bentuk *Sine Wave* (SW) dengan Amplitudo 45 yang setara dengan sudut maksimum 45°, Kecepatan kendaraan bervariasi dari: 25, 50 dan 100 Km/h. Berikut adalah pengujian input sistem kontrol antara sudut *steer* berbentuk *Continues Steer Angle Sine Wave* (SW) dan sudut roda yang berubah sesuai dengan *Steering Rasio* dan kecepatan kendaraan.



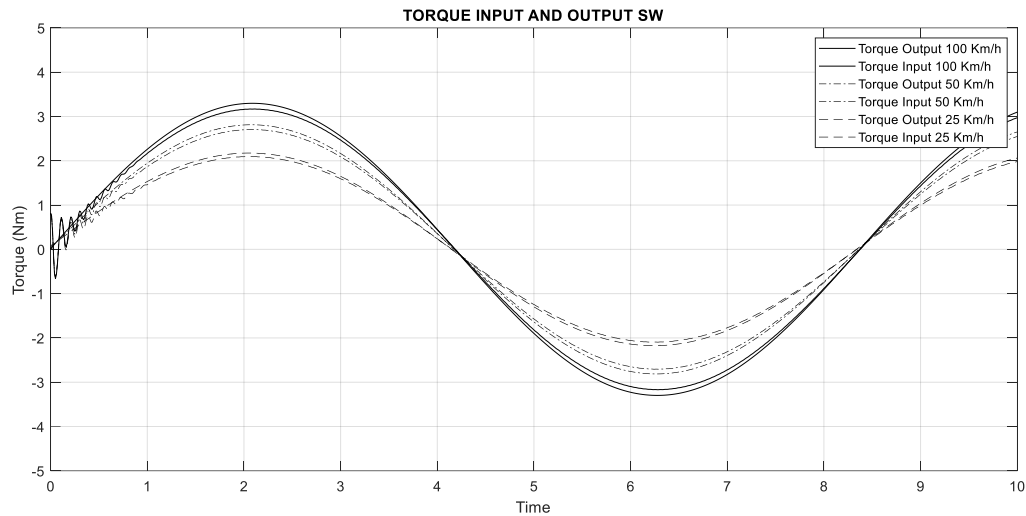
Gambar 4. Input *Steer* dan Roda *Continues Steer Angle Sine Wave*

Tabel 1. Input *Steer* dan Roda *Continues Steer Angle Sine Wave*

Peak	Speed 25 Km/h		Speed 50 Km/h		Speed 100 Km/h	
	Steer Angle (°)	Wheel Angle (°)	Steer Angle (°)	Wheel Angle (°)	Steer Angle (°)	Wheel Angle (°)
Max	44.99976	3.103431	44.99976	2.647044	44.99976	2.045443
Min	-44.99999	-3.103440	-44.99999	-2.647050	-44.99999	-2.045450

Hasil Pengujian menunjukkan input sudut *steer* secara *continues* berbentuk *sine wave* dengan amplitudo 45 setara dengan *sudut steer* maksimum 45° dengan kecepatan kendaraan dibuat konstan pada; 25, 50 dan 100 Km/h, sudut *steer* tetap mempunyai amplitudo yang sama dan sudut roda yang dihasilkan dari ratio *steer* sebagai fungsi dari kecepatan; $SR(V) = 0.1V + 12$ mencapai amplitudo maksimum 3.103431 pada kecepatan kendaraan 25 Km/h dan amplitudo ini menurun pada kecepatan kendaraan semakin tinggi yaitu mencapai amplitudo 2.045443 pada kecepatan 100Km/h.

Selanjutnya input *steer* diubah menjadi torsi Inersia dan penambahan torsi yang lain yaitu torsi gesekan dan torsi jalan menjadi torsi total sebagai input sistem kontrol FLC-MQPSO untuk menghasilkan torsi output berupa torsi motor yang dibangkitkan sebagai umpan balik *road feeling* bagi pengemudi. Pengujian dilakukan dengan input *steer* yang sama pada tiga kecepatan konstan yang berbeda yaitu: 25, 50 dan 100 km/h. Hasil pengujian sistem kontrol torsi tersebut dinyatakan pada gambar 6 dan tabel 2.



Gambar 5. Torsi Input dan Output Continues Steer Angle Sine Wave

Tabel 2. Torsi Input dan Output Continues Steer Angle Sine Wave

Peak	Speed 25 Km/h		Speed 50 Km/h		Speed 100 Km/h	
	Torque Input (Nm)	Torque Output (Nm)	Torque Input (Nm)	Torque Output (Nm)	Torque Input (Nm)	Torque Output (Nm)
Max	3.169113	3.29750	2.706669	2.812889	2.095623	2.174607
Min	-3.169333	-3.29749	-2.706490	-2.812880	-2.095510	-2.174610

Hasil Simulasi sistem kontrol torsi *road feeling* SbW menunjukkan bahwa Torsi output dapat dikontrol oleh FLC-MQPSO dengan C-RMS error at 0.000999, dengan selisih torsi antara input dan output adalah sebesar 0.12839 Nm pada 25 Km/h; 0.10622 Nm pada 50 Km/h dan 0.07898 Nm pada 100Km/h, namun pada torsi output terdapat torsi vibrasi pada awal pembangkitan torsi lawan oleh motor hal ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik motor yang dalam simulasi ini dinyatakan dalam transfer function. Bagian ini menyajikan hasil penelitian. Hasil penelitian dapat dilengkapi dengan tabel, grafik/gambar, dan/atau bagan. Bagian pembahasan memaparkan hasil pengolahan data, menginterpretasikan penemuan secara logis, mengaitkan dengan sumber rujukan yang relevan.

4. KESIMPULAN

Pada sudut *steer* yang kecil, torsi kemudi yang diperlukan relatif rendah karena gaya resistensi yang harus diterima juga kecil. Namun, ketika sudut *steer* semakin besar, resistensi yang dihadapi oleh roda depan menjadi lebih besar, sehingga torsi kemudi yang diperlukan meningkat. Pada kecepatan yang lebih tinggi, torsi kemudi yang dibutuhkan lebih rendah untuk sudut *steer* yang sama. Secara keseluruhan, semakin besar sudut *steer*, semakin besar pula torsi kemudi yang dibutuhkan untuk mengatasi resistensi dan mempertahankan arah kendaraan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada DRTPM Kemendikbudristek yang telah membiayai penelitian ini dan LPPM Universitas Widyagama Malang yang telah membantu penyelesaian paper ini.

6. REFERENSI

- [1] Z. Yang, G. Li, H. He, and G. Li, "Study on road feeling simulation control algorithm for four-wheel independent drive and steering electric vehicle," in *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, Oct. 2017, pp. 4872–4875. doi: 10.1109/CAC.2017.8243641.
- [2] F. Hunaini, I. Robandi, and N. Sutantra, "Optimization of automatic steering control on a vehicle with a steer-by-wire system using particle swarm optimization," *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 24; 2, pp. 541–557, Feb. 2016.
- [3] D. Cheon, C. Lee, S. Oh, and K. Nam, "Description of Steering Feel in Steer-by-Wire System Using Series Elastic Actuator," in *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Oct. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/VPPC46532.2019.8952490.
- [4] Liuhe, X. Zeng, and L. Shuo, "Design of road feel feedback algorithm for steer-by- Wire," in *2020 4th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*, Dec. 2020, pp. 142–146. doi: 10.1109/CVCI51460.2020.9338568.
- [5] H. Zheng, J. Zhou, and B. Li, "Design of Adjustable Road Feeling Performance for Steering-by-Wire System," *SAE Int. J. Veh. Dyn. Stab. NVH*, vol. 2, no. 2, Art. no. 10-02-02-0008, Jun. 2018, doi: 10.4271/10-02-02-0008.
- [6] M. S. Arslan, "A Hysteresis-Based Steering Feel Model for Steer-by-Wire Systems," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2017, p. e2313529, Nov. 2017, doi: 10.1155/2017/2313529.
- [7] A. Balachandran and J. C. Gerdes, "Designing Steering Feel for Steer-by-Wire Vehicles Using Objective Measures," *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 20, no. 1, pp. 373–383, Feb. 2015, doi: 10.1109/TMECH.2014.2324593.
- [8] F. Hunaini, I. Robandi, and N. Sutantra, "Model and Simulation of Vehicle Lateral Stability Control," presented at the 2nd APTECS, 2010, International Seminar on Applied Technology, Science, and Arts, in 2. Surabaya, ITS: LPPM ITS, Dec. 2010, p. 26.
- [9] F. Hunaini, I. Robandi, and N. Sutantra, "Lateral and Yaw Motion Control of The Vehicle using Fuzzy Logic and PID being Optimized by Firefly Algorithm," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 87, no. 1, pp. 16–24, May 2016.
- [10] F. Hunaini, E. Ishak, F. Rofii, S. Setiawidayat, and Istiadi, "Hardware in the Loop Simulation of Control Optimal of DC Motor Base on Modified Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1908, no. 1, p. 012017, Jun. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1908/1/012017.
- [11] M. S. Alvarez-Alvarado, F. E. Alban-Chacón, E. A. Lamilla-Rubio, C. D. Rodríguez-Gallegos, and W. Velásquez, "Three novel quantum-inspired swarm optimization algorithms using different bounded potential fields," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-90847-7.
- [12] H. Patidar, G. K. Mahanti, and R. Muralidharan, "Quantum Particle Swarm Optimization for Synthesis of Non-uniformly Spaced Linear Arrays with Broadband Frequency Invariant Pattern," *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, vol. 16, pp. 602–614, Sep. 2017, doi: 10.1590/2179-10742017v16i3790.
- [13] J. Lee and S.-K. Sul, "Identification of the System Inertia under Periodic Load Torque Disturbance," in *2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia)*, Nov. 2020, pp. 85–89. doi: 10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9367637.

- [14] A. Albinsson, F. Bruzelius, B. Jacobson, and M. Jonasson, "Tire Force Estimation Utilizing Wheel Torque Measurements and Validation in Simulations and Experiments," 2014. Accessed: Sep. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Tire-Force-Estimation-Utilizing-Wheel-Torque-and-in-Albinsson-Bruzelius/21ed69a0618c80016695004bc1aca094c2a4ffed>
- [15] D. Foito, M. Gaspar, and V. F. Pires, "Road motion control electric vehicle with speed and torque observer," in *2013 International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE)*, Dec. 2013, pp. 1–6. doi: 10.1109/SmartMILE.2013.6708210.
- [16] T. Zhuang and J. R. R. Mayer, "Prediction of machine tool's static translational volumetric error caused by compliance from feed motor torque," *Procedia CIRP*, vol. 121, pp. 127–132, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.procir.2023.09.239.
- [17] F. Hunaini, F. Nugroho, P. Suwandono, and G. Subiyakto, "The cascade optimal control of steer by wire system using hardware in the loop simulations," *Int. J. Power Electron. Drive Syst. IJPEDS*, vol. 13, no. 2, Art. no. 2, Jun. 2022, doi: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp764-772.
- [18] F. Hunaini, D. D. Nafis, P. Suwandono, and G. Subiyakto, "Semi-automatic of steer by wire system using fuzzy logic control and swarm optimization," *Int. J. Power Electron. Drive Syst. IJPEDS*, vol. 14, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2023, doi: 10.11591/ijpeds.v14.i3.pp1394-1402.
- [19] J. Huang and B. Xiao, "Variable steering ratio design and handling stability research for steer-by-wire forklift," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 11, no. 3, p. 1687814018822898, Mar. 2019, doi: 10.1177/1687814018822898.
- [20] Z. Xin-gang, L. Ji, M. Jin, and Z. Ying, "An improved quantum particle swarm optimization algorithm for environmental economic dispatch," *Expert Syst. Appl.*, vol. 152, p. 113370, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2020.113370.