

Vol. 18 No. 2 (2021): OCTOBER 2021



Jurnal Teknik Mesin (JTM) merupakan Jurnal Keilmuan dan Terapan Teknik Mesin yang dikelola oleh Universitas Kristen Petra. **JTM** terbit pertama pada April 1999.

JTM diterbitkan setiap bulan April dan Oktober. Tujuan penerbitan jurnal ini antara lain adalah untuk:

1. Menyebarluaskan pengetahuan, pengalaman/terapan dan temuan baru para ilmuwan atau praktisi di bidang teknik mesin.
 2. Meningkatkan motivasi para ilmuwan dan praktisi untuk melakukan penelitian dan pengembangan ilmu di bidang teknik mesin.

PUBLISHED: 2021-10-21

ARTICLES

Perancangan Adjustable Handlebar untuk Sepeda Motor dengan Dua Sistem Pengaturan

David Oboe Kristiawan, Yopi Yusuf Tanoto, Ian Hardianto Siahaan, Naldi Naldi

33-38



Pemanfaatan Sensor Suara sebagai Fitur On/Off Switch pada Engine Starter dan Power Tailgate Kendaraan

Ian Hardianto Siahaan, Kresna Vincent, Teng Sutrisno, Ninuk Jonoadji

39-43

 [PDF](#)

Pemodelan Torque Vectoring Sebagai Upaya Untuk Meningkatkan Stabilitas

Pengendalian Mobil Listrik

Roche Alimin, Ian Hardianto Siahaan, Andre Saputra

44-50

 [PDF](#)

Remanufacturing: Strategi dan Desain dalam Rantai Pasok Lingkaran Tertutup

Gan Shu San, Didik Wahjudi, Yopi Yusuf Tanoto

51-59

 [PDF](#)

Bioethanol Limbah Kulit Jeruk Manis (*Citrus Sinensis L. Osbeck*) Sebagai Peningkatan Nilai Oktan

Teng Sutrisno, Muhammad Robby Falito, Willyanto Anggono, Melvin Emil Simanjuntak

60-64

 [PDF](#)

--Beranda--

Informasi JTM

Dewan Editor & Mitra Bestari

Fokus dan Ruang Lingkup

Pengiriman Makalah

Etika Publikasi

Sekretariat JTM



Jurnal Teknik Mesin

**Author
Guidelines**



Peer Reviewed Scientific-e Journal



Citation-GoogleScholar : JTM		
	All	Since 2017
Citations	1188	785
h-index	17	14
i10-index	40	25
JTM		*

[00196063](#) [View My Stats](#)

Jurnal Teknik Mesin ini terindex dengan :



Aplikasi Jurnal



Platform &
workflow by
OJS / PKP

Pemodelan Torque Vectoring Sebagai Upaya Untuk Meningkatkan Stabilitas Pengendalian Mobil Listrik

Roche Alimin^{1*}, Ian Hardianto Siahaan², Andre Saputra³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra

Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236, Indonesia

* Penulis korespondensi; E-mail: ralimin@petra.ac.id

ABSTRAK

Produsen otomotif saat ini sedang gencar-gencarnya melakukan pengembangan mobil listrik. Selain karena mobil listrik lebih mudah untuk diarahkan kepada penggunaan energi yang lebih ramah lingkungan, mobil listrik juga lebih fleksibel di dalam penerapan teknologi kontrol yang lebih mutakhir. Saat ini salah satu sistem kontrol yang tersedia dan dikembangkan pada mobil listrik adalah Torque Vectoring. Pada penelitian ini dilakukan pengembangan algoritma sistem Torque Vectoring beserta sistem kontrolnya melalui pemodelan dan simulasi MATLAB-Simulink. Metode kontrol yang digunakan adalah kontroler PID. Variabel yang diukur untuk melihat keefektivitas sistem Torque Vectoring adalah yaw rate, sudut kemudi, sudut sideslip, traksi pada setiap ban, percepatan longitudinal dan lateral, kecepatan longitudinal, slip longitudinal di setiap ban, dan torsi output di setiap roda. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa algoritma sistem Torque Vectoring yang dikembangkan mampu meningkatkan stabilitas pengendalian mobil listrik. Sistem Torque Vectoring tersebut mampu beroperasi pada berbagai kondisi jalan dan manuver mobil, sehingga mobil dengan sistem Torque Vectoring lebih dapat dikendalikan dan stabil jika dibandingkan dengan mobil tanpa sistem Torque Vectoring.

Kata kunci: Dinamika kendaraan, *torque vectoring*, kendaraan listrik, distribusi torsi, PID.

ABSTRACT

Automotive manufacturers are currently intensively developing electric cars. Apart from the fact that electric cars are easier to direct towards the use of more environmentally friendly energy, electric cars are also more flexible in the implementation of more advanced control technologies. Currently, one of the control systems available and developed in electric cars is Torque Vectoring. In this research study, the development of the Torque Vectoring system algorithm and its control system was carried out through MATLAB-Simulink modeling and simulation. The control method used is the PID controller. The variables measured to see the effectiveness of the Torque Vectoring system are yaw rate, steering angle, sideslip angle, traction on each tire, longitudinal and lateral acceleration, longitudinal speed, longitudinal slip on each tire, and output torque on each wheel. From this research study, it is concluded that the developed Torque Vectoring system algorithm is able to improve the stability of electric car control. The Torque Vectoring system is capable of operating in various road conditions and car maneuvers, so a car with a Torque Vectoring system is more controllable and stable than a car without a Torque Vectoring system.

Keywords: Vehicle dynamics, *torque vectoring*, electric car, *torque distribution*, PID.

PENDAHULUAN

Pesatnya perkembangan mobil listrik membuat banyak produsen otomotif berlomba mengembangkan teknologi mobil listrik mereka sendiri. Dari sisi pengaturan performa, mobil listrik lebih banyak menyediakan fleksibilitas daripada mobil konvensional sehingga implementasi kontrol yang lebih mutakhir menjadi lebih memungkinkan. Perkembangan teknologi mobil listrik dalam beberapa tahun terakhir ini begitu pesat sejalan dengan pertumbuhan produksi mobil listrik. Di tahun 2018, jumlah

mobil listrik global melebihi 5,1 juta unit, lebih banyak 2 juta unit jika dibandingkan dengan tahun sebelumnya [1].

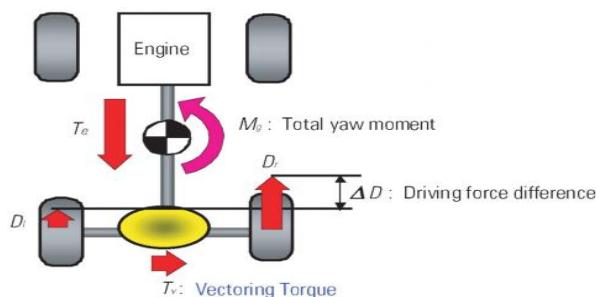
Mobil listrik memiliki kelebihan bila dibandingkan mobil konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil. Mobil listrik menyediakan fleksibilitas dan kontrol yang lebih baik [2]. Dengan kelebihan ini maka kontrol dan peningkatan performa mobil listrik dapat dilakukan dengan lebih mudah tanpa perlu menambahkan komponen mekanis tertentu pada mobil.

Salah satu sistem kontrol yang tersedia dan dikembangkan pada mobil listrik saat ini adalah *Torque Vectoring*. Istilah *Torque Vectoring* pertama kali diperkenalkan oleh *Ricardo PLC*, sebuah perusahaan pengembang teknologi dalam bidang otomotif pada *SAE Technical Paper 2004-01-0863*. Pada saat itu teknologi *Torque Vectoring* dikembangkan untuk diferensial mobil 4WD, yaitu untuk mendistribusikan torsi keluaran dari mesin sesuai dengan kondisi dinamika kendaraan. Sejak saat itu banyak pabrikan otomotif seperti Toyota, Ford, Nissan dan lainnya mulai mengembangkan sistem *Torque Vectoring* untuk diterapkan pada mobil-mobil mereka. Prinsip dari sistem pendistribusian torsi pada mobil sudah dikembangkan dan dipatenkan dengan nomor paten *US5376868A* pada tahun 1994. Saat ini sistem *Torque Vectoring* digunakan pada mobil listrik untuk mengontrol keluaran torsi dan putaran dari setiap motor listrik sesuai dengan dinamika kendaraan sehingga bisa memaksimalkan traksi pada setiap roda mobil. Ini akan meningkatkan performa kendaraan ketika menikung dan dinamika lateral kendaraan tanpa memberikan pengaruh negatif terhadap performa dinamika longitudinal kendaraan [3]. Pada akhirnya sistem *Torque Vectoring* ini akan menggantikan dan memadukan sistem *ESP (Electronic Stability Program)* dan *TCS (Traction Control System)*.

Gambar 1 menunjukkan cara dari sistem *Torque Vectoring* untuk mobil RWD. Prinsip dari *Torque Vectoring* tetap sama untuk mobil FWD dan AWD. Ketika torsi yang berbeda didistribusikan ke masing-masing roda penggerak, maka terdapat perbedaan gaya longitudinal pada roda penggerak. Perbedaan gaya longitudinal ini akan menghasilkan momen *yaw* tambahan, ΔM_z , yang membantu mobil untuk menikung.

$$\Delta M_z = \frac{w}{2} (F_{x_r} - F_{x_l})$$

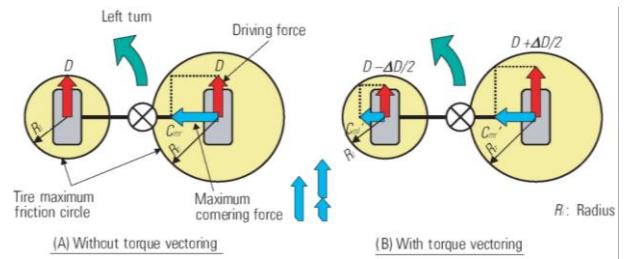
dengan F_{x_r} adalah gaya longitudinal pada roda penggerak kanan, F_{x_l} adalah gaya longitudinal pada roda penggerak kiri, dan w adalah jarak dari roda penggerak kiri ke roda penggerak kanan.



Gambar 1. Definisi *Torque Vectoring*. Sumber: Stoop (2014, p. 12)

Efek dari sistem *Torque Vectoring* dapat dilihat pada Gambar 2. Dengan distribusi torsi yang berbeda ke setiap roda maka roda bagian luar dapat memaksimalkan potensi gaya pada roda sampai pada batasnya (sesuai dengan *friction ellipse*) dan bisa

mengurangi beban pada roda bagian dalam ketika menikung (juga sesuai dengan *friction ellipse*).



Gambar 2. Efek dari *Torque Vectoring* [4]

Implementasi sistem *Torque Vectoring* pada mobil listrik akan lebih mudah apabila mobil listrik tersebut memiliki 2 atau 4 motor listrik yang menggerakkan roda secara independen (*in-wheel motor*). Dengan demikian torsi positif dan negatif dapat dihasilkan secara langsung dari motor listrik sehingga tidak memerlukan diferensial seperti yang biasa ditemui pada mobil konvensional.

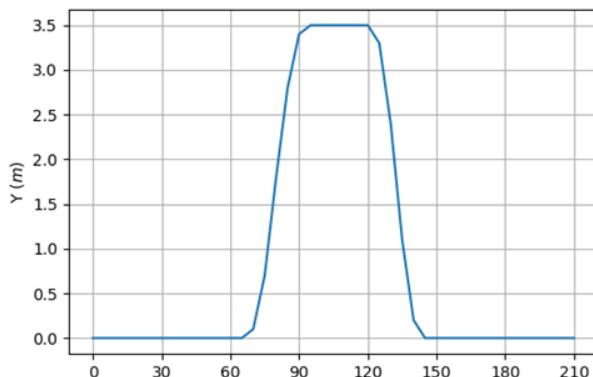
Isu utama dari perancangan sistem *Torque Vectoring* ini adalah ada banyak pendekatan dan cara untuk mengoptimalkan distribusi torsi pada setiap roda penggerak [5]. Oleh karena itu, untuk saat ini belum ada kesepakatan umum mengenai bagaimana cara yang optimal untuk memanfaatkan potensi penuh dari sistem ini [6][7]. Berikut ini adalah penelitian-penelitian terdahulu. Ada beragam pemodelan dan metode kontrol yang digunakan didalam memodelkan sistem *Torque Vectoring* ini. Untuk metode kontrol ada yang menggunakan *Fuzzy Logic* [8], *Linear Parameter-Varying* [9], *Model Predictive Control* [10], *Proportional Integral Derivative* [11], dan *Sliding Mode Controller* [12]. Model dinamika kendaraan yang digunakan bervariasi, mulai dari 2 *DOF* sampai dengan 14 *DOF*. Model ban yang digunakan juga bervariasi, seperti model ban Pacejka, Dugoff dan Burckhardt.

Kendala-kendala yang terdapat pada penelitian ini adalah adanya algoritma kontrol yang rumit sehingga beban dalam melakukan proses komputasi pada mikrokontroler menjadi lebih berat. Beberapa penelitian terdahulu juga kurang mempertimbangkan batasan-batasan fisik seperti torsi keluaran maksimum dari motor listrik. Sampai dengan saat ini masih belum ada kesepakatan umum terkait dengan bagaimana memanfaatkan potensi penuh dari sistem *Torque Vectoring* ini [13][14].

Penelitian ini bertujuan memodelkan secara matematis sistem *Torque Vectoring* dan melihat efektifitas sistem *Torque Vectoring* dalam meningkatkan stabilitas pengendalian mobil listrik jika dibandingkan dengan mobil listrik tanpa sistem *Torque Vectoring*. Hasil dari penelitian ini diharapkan bermanfaat untuk mengembangkan sistem *Torque Vectoring* yang simpel dan efektif, serta dapat diterapkan pada mobil listrik dengan berbagai konfigurasi (FWD, RWD ataupun AWD).

METODOLOGI

Penelitian ini dimulai dengan menentukan parameter untuk memodelkan dinamika kendaraan, sistem *Torque Vectoring* dan sistem kontrolnya. Setelah parameter didapatkan maka dilakukan pemodelan dinamika kendaraan, sistem *Torque Vectoring* dan sistem kontrolnya. Kemudian diverifikasi apakah model mengeluarkan nilai yang seharusnya ketika melakukan perhitungan. Setelah hasilnya sesuai maka simulasi sistem dapat dilakukan. Sistem *Torque Vectoring* disimulasikan di *MATLAB-Simulink* dengan manuver *double lane change* dengan kecepatan *entry* 80 km/jam. Prosedur *double lane change* adalah tes untuk mensimulasikan manuver darurat untuk menentukan dinamika pengendalian transien kendaraan (*vehicle transient handling dynamics*). Tes ini umum digunakan karena berhubungan dengan mobil yang lebih aman dan terkontrol adalah ketika mobil didorong sampai ke batas pengendaliannya, ada peluang yang lebih besar bagi pengemudi untuk menghindari kecelakaan [15]. Dimensi jalur dapat dilihat pada Gambar 3.



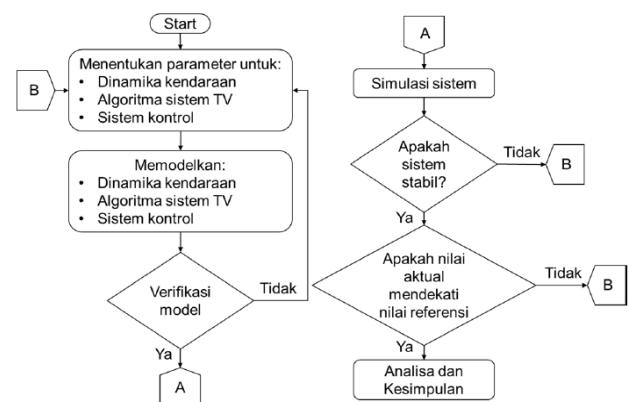
Gambar 3. Dimensi jalur *double lane change*, dalam satuan meter

Dari hasil simulasi akan diamati apakah sistem stabil dan nilai aktual mobil mendekati nilai referensi dari perhitungan. Jika belum stabil dan belum sesuai maka akan dilakukan proses *tuning* parameter ulang pada tahap verifikasi model sampai stabil dan nilai sudah mendekati nilai referensi. Data hasil simulasi akan dianalisa keefektivitasan sistem *Torque Vectoring* dalam meningkatkan stabilitas pengendalian mobil listrik. Untuk lebih detailnya dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 4.

Adapun lingkup pemodelan sistem *Torque Vectoring* yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut: Pemodelan sistem *Torque Vectoring* dibatasi untuk mobil listrik *independent wheel drive* dengan masing-masing *in-wheel motor*-nya pada keempat rodanya. Dimensi mobil dan ban mengikuti spesifikasi dan dimensi model yang telah ditetapkan/*default*. Simulasi berfokus pada pengujian sistem pada *steering manuver* dan akselerasi. Gerakan *roll* dan *pitch* mobil serta gaya-gaya aerodinamis pada

bodi mobil diabaikan. Torsi maksimum di setiap motor sebesar 1500 Nm. Pada pengujian akselerasi torsi dibatasi menjadi 1200 Nm untuk koefisien gesek ban dengan jalan $\mu = 0,6$ dan 800 Nm untuk $\mu = 0,3$.

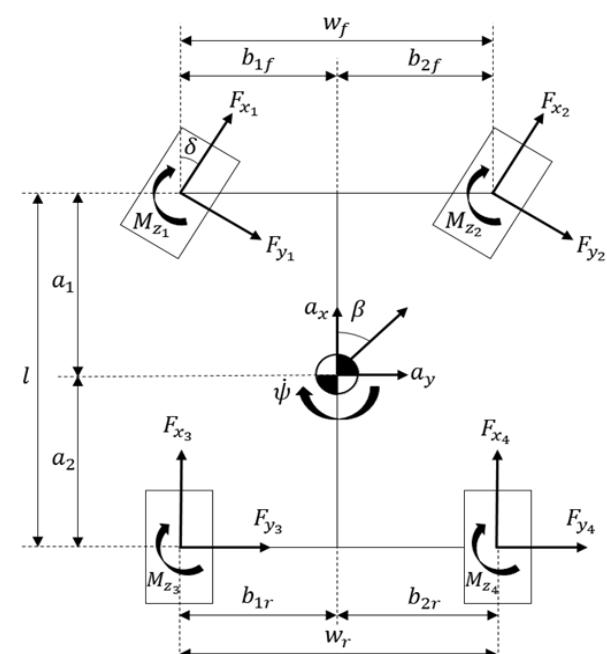
Variabel yang akan menjadi indikator keefektifan *Torque Vectoring* pada penelitian ini adalah *yaw rate*, yaitu nilai *yaw rate* pada mobil $\dot{\psi}$ yang dibandingkan dengan nilai *yaw rate* referensi $\dot{\psi}_{ref}$, besar sudut kemudi δ , *slip longitudinal* di setiap ban dan torsi *output* di setiap roda. Kesemuaannya dibandingkan antara kondisi dengan *Torque Vectoring* dan tanpa *Torque Vectoring*.



Gambar 4. Diagram alir metodologi

Pemodelan Dinamika Kendaraan

Model *vehicle handling* memiliki 7 DOF, yang terdiri dari bodi mobil memiliki 3 DOF (longitudinal, lateral, *yaw*) dan 4 DOF berupa putaran dari masing-masing roda [16]. *Free body diagram* dari model *vehicle handling* dapat dilihat pada Gambar 5.

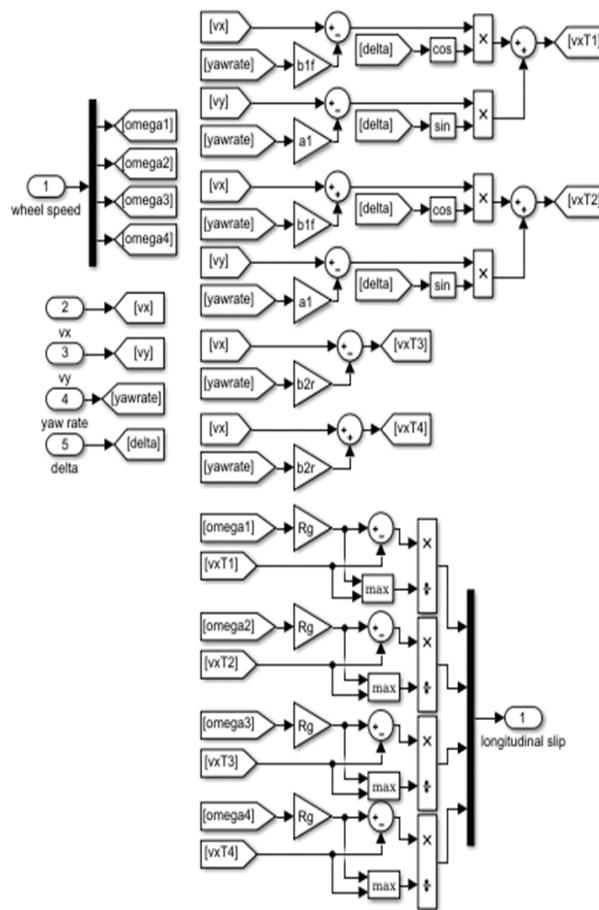


Gambar 5. *Free body diagram* dari model *vehicle handling*

Nilai sudut kemudi δ diperoleh dari rata-rata sudut belok roda depan kiri δ_1 dan sudut belok roda depan kanan δ_2 .

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}$$

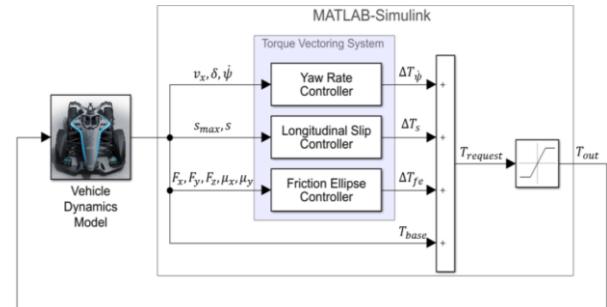
Ada beberapa pemodelan yang dilakukan pada *penelitian* ini, antara lain: pemodelan *vehicle handling*, pemodelan gerak longitudinal kendaraan, pemodelan gerak lateral kendaraan, pemodelan gerak *yaw* kendaraan, pemodelan gerak berputar pada roda kendaraan, pemodelan gerak *sideslip* tiap roda dan pemodelan gerak slip longitudinal tiap roda. Namun demikian pada makalah ini hanya akan dibahas untuk gerak slip longitudinal tiap roda. Gambar 6 adalah *block diagram* dari model slip longitudinal pada tiap roda tersebut.



Gambar 6. *Block diagram* dari model slip longitudinal pada tiap roda

Pemodelan Sistem *Torque Vectoring*

Model sistem *Torque Vectoring* ini terdiri dari 3 *bagian* besar, yaitu model *reference value generator*, model kontrol *yaw rate*, dan model kontrol distribusi torsi ke roda. Pemodelan sistem *Torque Vectoring* dilakukan dengan menggunakan software MATLAB-Simulink, dengan *plant* yang didapat dari model dinamika kendaraan. Skema simulasinya dapat dilihat pada Gambar 7.

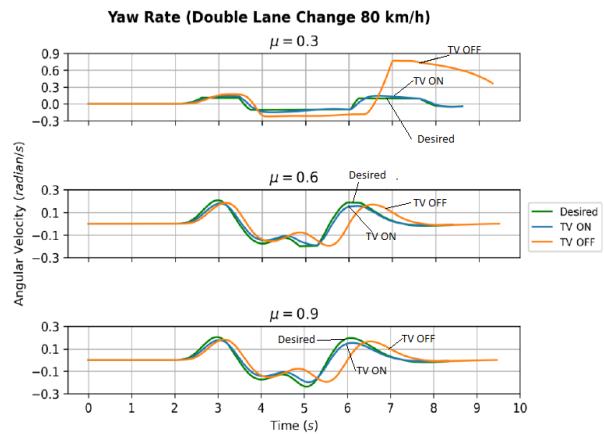


Gambar 7. Skema simulasasi sistem *Torque Vectoring* pada Simulink

Kontroler *yaw rate* berfungsi untuk mengendalikan mobil ketika dalam kondisi menikung. Kontroler *longitudinal slip* berfungsi untuk mengendalikan mobil ketika dalam kondisi akselerasi. Sedangkan kontroler *friction ellipse* berfungsi untuk mengendalikan mobil pada semua kondisi manuver mobil.

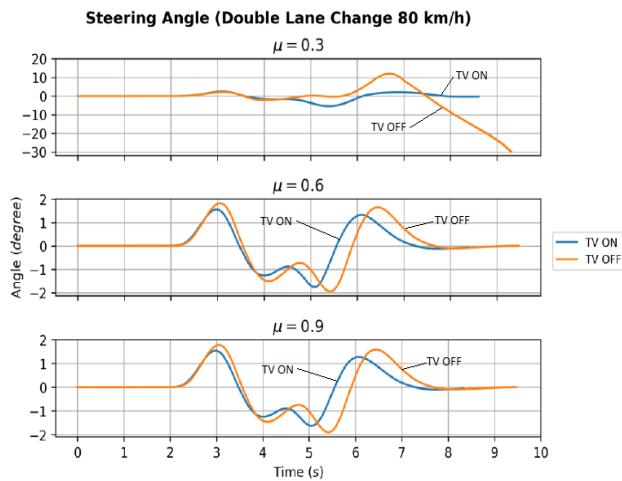
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari grafik *yaw rate* pada Gambar 8 terlihat bahwa mobil yang dilengkapi dengan sistem *Torque Vectoring* (TV ON) dapat mendekati nilai *desired yaw rate* yang merupakan *yaw rate* yang diinginkan oleh pengemudi berdasarkan kecepatan dan sudut kemudi. Sedangkan apabila mobil tidak dilengkapi dengan sistem *Torque Vectoring* (TV OFF) maka mobil cenderung menjadi tidak stabil. Hal ini terjadi khususnya pada permukaan jalan licin ($\mu = 0,3$). Dan pada permukaan jalan yang lebih kasar ($\mu = 0,6$ dan $\mu = 0,9$) respon mobil masih dapat mengikuti permintaan pengemudi tetapi lebih lambat.



Gambar 8. Grafik *yaw rate* mobil pada manuver *double lane change* dengan permukaan jalan (μ) yang berbeda

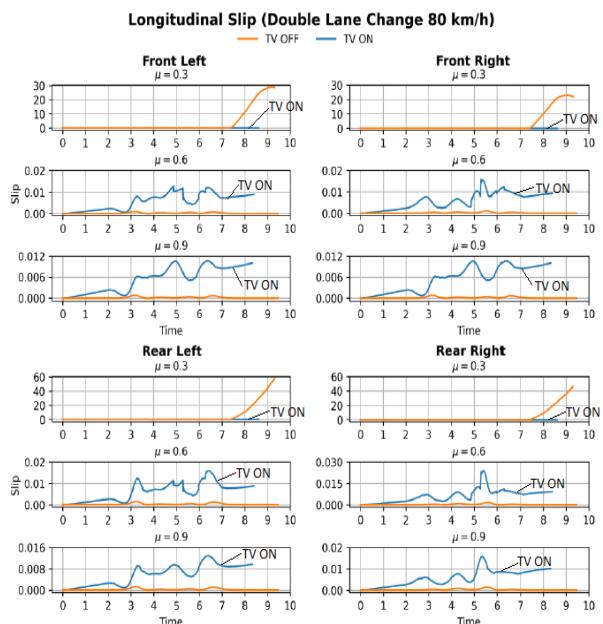
Dari grafik sudut kemudi pada Gambar 9 terlihat bahwa TV ON dapat mengurangi input sudut kemudi dari pengemudi. Ketika jalan licin, koreksi sudut kemudi yang diberikan pengemudi untuk menjaga mobil tetap pada jalur jauh menjadi lebih kecil bila dibandingkan dengan TV OFF. Sudut kemudi yang dimaksud adalah sudut rata-rata dari sudut belok roda kiri depan dan roda kanan depan.



Gambar 9. Grafik sudut kemudi mobil pada manuver *double lane change* dengan permukaan jalan (μ) yang berbeda

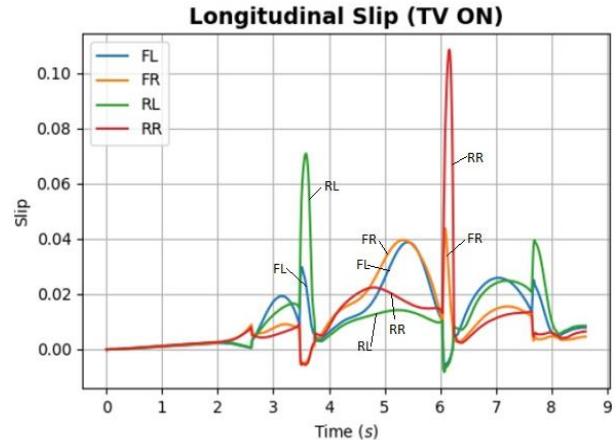
Dari grafik slip longitudinal pada Gambar 10 terlihat bahwa TV ON dapat menjaga slip longitudinal di setiap roda untuk tetap di bawah batas slip maksimum senilai 0,15. Perbedaan yang signifikan terlihat pada kondisi jalan licin ($\mu = 0,3$). Pada kondisi ini slip longitudinal pada TV ON dapat ditekan di bawah 0,15, dan ketika TV OFF nilai slip menjadi sangat besar. Sedangkan pada kondisi jalan yang lebih kasar ($\mu=0,6$ dan $\mu=0,9$) terlihat bahwa TV ON dan TV OFF tidak terjadi slip longitudinal yang cukup signifikan.

Performa *yaw rate* (*error yaw rate*) yang dihasilkan sejalan dengan hasil penelitian Fricano [3] yang menyatakan bahwa dengan *Torque Vectoring*, kendaraan menunjukkan performa dinamika lateral yang baik tanpa memberikan pengaruh negatif terhadap performa dinamika longitudinal kendaraan [3].



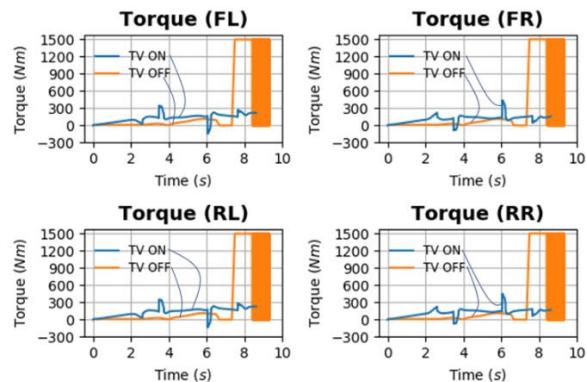
Gambar 10. Grafik slip longitudinal pada setiap roda pada manuver *double lane change* dengan permukaan jalan (μ) yang berbeda

Untuk besar nilai slip longitudinal TV ON di setiap roda pada kondisi jalan licin yang lebih rinci dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Grafik slip longitudinal TV ON pada setiap roda pada kondisi jalan licin ($\mu = 0,3$)

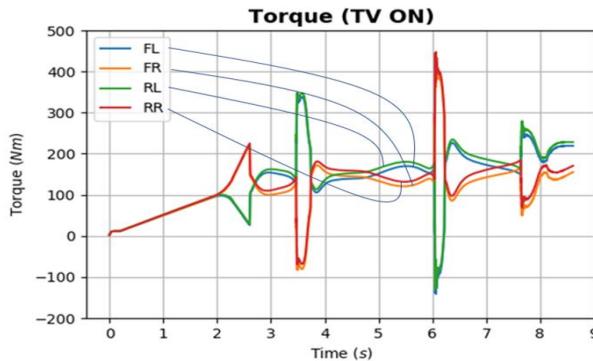
Grafik pada Gambar 12 memperlihatkan bahwa torsi *output* TV OFF lebih besar daripada TV ON. Namun, di $t = 7$ s, terjadi osilasi nilai torsi *output*. Hal ini dapat dibandingkan dengan grafik *slip* longitudinal TV OFF pada Gambar 10, dimana pada waktu yang sama, mobil mengalami kenaikan nilai *slip* yang signifikan. Ini menunjukkan bahwa torsi dari motor listrik tidak dapat disalurkan dengan baik oleh ban ke jalan. Osilasi pada torsi *output* motor dapat menyebabkan motor mengalami *wear* yang lebih besar, yang berakibat pada umur motor yang berkurang. Hal ini tentu bisa dihindari dengan penggunaan sistem *Torque Vectoring*, dimana torsi dapat dikontrol untuk setiap motor sehingga dapat memaksimalkan traksi.



Gambar 12. Grafik torsi *output* TV ON pada setiap roda pada kondisi jalan licin ($\mu = 0,3$)

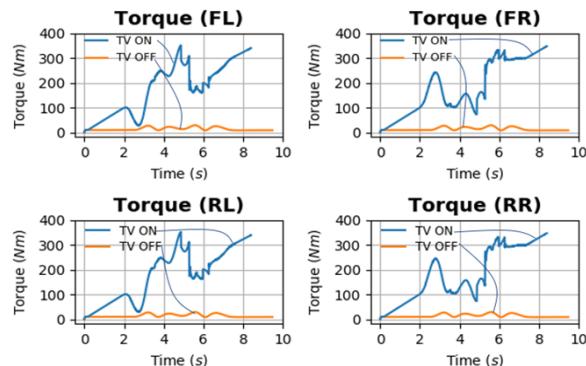
Gambar 13 memperlihatkan nilai torsi ban kiri berbanding terbalik dengan nilai torsi ban kanan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *Torque Vectoring* dapat mengontrol torsi *output* setiap motor sehingga dapat menghasilkan perbedaan nilai torsi motor antara roda kiri dan

kanan, yang pada akhirnya membantu mobil dalam menghasilkan momen *yaw* bagi mobil untuk menikung.

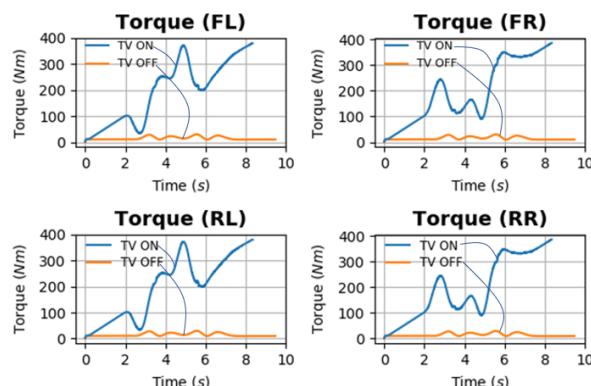


Gambar 13. Grafik torsi *output* TV ON pada kondisi jalan licin ($\mu = 0,3$)

Untuk jalan yang lebih kasar ($\mu = 0,6$ dan $\mu = 0,9$) masing-masing grafik torsi *output* memperlihatkan *trend* yang senada, yaitu torsi *output* pada TV ON lebih besar daripada TV OFF. Hal ini sudah sewajarnya karena sistem *Torque Vectoring* mengontrol manuver mobil dengan mengatur torsi *output* di setiap motor. Hal ini diperlihatkan pada Gambar 14 dan 15 bahwa torsi roda kiri depan sama dengan torsi roda kiri belakang. Begitu pula dengan kedua roda yang di sebelah kanan.



Gambar 14. Grafik torsi *output* TV ON pada setiap roda pada kondisi jalan licin ($\mu = 0,6$)



Gambar 15. Grafik torsi *output* TV ON pada setiap roda pada kondisi jalan licin ($\mu = 0,9$)

KESIMPULAN

Dari hasil pemodelan dan simulasi dapat disimpulkan bahwa sistem *Torque Vectoring* mampu meningkatkan kestabilan dan pengendalian mobil listrik, khususnya ketika kondisi jalan licin. Sistem *Torque Vectoring* juga mampu mengurangi input dari pengemudi untuk mengoreksi posisi mobil untuk kembali ke jalur yang diinginkan pengemudi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. IEA, Global EV outlook, 2019, *Scaling-up Transition to Electric Mobility*, <http://iea.org>. [Accessed on September 9th 2019]
- [2]. Wong, A., Kasinathan, D., Khajepour, A., Chen, S.K., Litkouhi, B., 2016, ‘Integrated Torque Vectoring and Power Management Framework for Electric Vehicles’, *Control Engineering Practice*, 48, pp. 22–36.
- [3]. Fricano, A., 2019, “*Design of Torque Vectoring System for Formula SAE Electric Vehicle*”, Master’s Thesis, Mechanical Engineering Department, Politecnico di Torino, Italia.
- [4]. Stoop, A., 2014, “*Design and Implementation of Torque Vectoring for the Forze Racing Car: In Collaboration with the Forze Hydrogen Racing Team*”, Master’s Thesis, Mechanical Engineering Department, Delft University of Technology, Belanda.
- [5]. Ghezzi, M. K., 2017, “*Control of a Four In-Wheel Motor Drive Electric Vehicle*”, Master’s Thesis, Industrial Engineering Department, Polytechnic University of Catalonia, Spanyol.
- [6]. Crolla, D. A., Cao, D., 2012, “The Impact of Hybrid and Electric Powertrains on Vehicle Dynamics, Control Systems and Energy Regeneration”, *Vehicle System Dynamics*, 50(sup1), 95–109. <https://doi.org/10.1080/00423114.2012.676651>
- [7]. Goggia, T., Sorniotti, A., De Novellis, L., Ferrara, A., Gruber, P., Theunissen, J., Steenbeke, D., Knauder, B., & Zehetner, J., 2015, “Integral Sliding Mode for The Torque-Vectoring Control of Fully Electric Vehicles: Theoretical Design and Experimental Assessment”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(5), pp. 1701–1715.
- [8]. Jalali, K., Uchida, T., Lambert, S., McPhee, J., 2013, ‘Development of an Advanced Torque Vectoring Control System for an Electric Vehicle with In-Wheel Motors using Soft Computing Techniques’, *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2(2), pp. 2013-01–0698.
- [9]. Kaiser, G., Holzmann, F., Chretien, B., Korte, M., Werner, H., 2011, “Torque Vectoring with a Feedback and Feed Forward Controller -Applied to a Through The Road Hybrid Electric Vehicle”, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IV, pp. 448–453.

- [10]. Ren, B., Chen, H., Zhao, H., & Yuan, L., 2015, “MPC-Based Yaw Stability Control in In-Wheel-Motored EV via Active Front Steering and Motor Torque Distribution”, *Mechatronics*, 38, pp. 103–114.
- [11]. Antunes, J., Antunes, A., Outeiro, P., Cardeira, C., & Oliveira, P., 2019, “Testing of a Torque Vectoring Controller for a Formula Student Prototype”, *Robotics and Autonomous Systems*, 113, pp. 56–62.
- [12]. Ding, S., Liu, L., & Zheng, W. X., 2017, “Sliding Mode Direct Yaw-Moment Control Design for In-Wheel Electric Vehicles”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(8), pp. 6752–6762.
- [13]. Crolla, D. A., & Cao, D., 2012, “The Impact Of Hybrid and Electric Powertrains on Vehicle Dynamics, Control Systems and Energy Regeneration”, *Vehicle System Dynamics*, 50(1), pp. 95–109.
- [14]. Goggia, T., Sorniotti, A., De Novellis, L., Ferrara, A., Gruber, P., Theunissen, J., Steenbeke, D., Knauder, B., Zehetner, J., 2015, “Integral Sliding Mode for The Torque-Vectoring Control of Fully Electric Vehicles: Theoretical Design and Experimental Assessment”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(5), pp. 1701–1715.
- [15]. Peng, Y., Yang, X., 2012, “Comparison of Various Double-Lane Change Manoeuvre Specifications”, *Vehicle System Dynamics*, 50(7), pp. 1157–1171.
- [16]. Setiawan, J. D., Safarudin, M., Singh, A., 2009, “Modeling, Simulation and Validation of 14 DOF Full Vehicle Model”, *International Conference on Instrumentation, Communication, Information Technology, and Biomedical Engineering, IEEE*, Bandung, Indonesia.