

USULAN PENELITIAN DISERTASI

DESAIN MODEL KENDALI PID ADAPTIF DALAM ALGORITMA MODIFIKASI REFERENCE ADAPTIF CONTROL (MRAC) PADA BRUSHLESS DC MOTOR (BLDC)

Disusun dan diajukan oleh

FITRIATY PANGERANG

D053201008



PROGRAM STUDI S3 TEKNIK ELEKTRO DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

PROGRAM PASCA SARJANA UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR 2023

SUPERVISOR DETAILS

Prof.Dr.Ing. Faizal Arya Samman, ST.MT, : Promotor

DR. Ir. Rhiza S.Sajad,MSEE : Co-Promotor

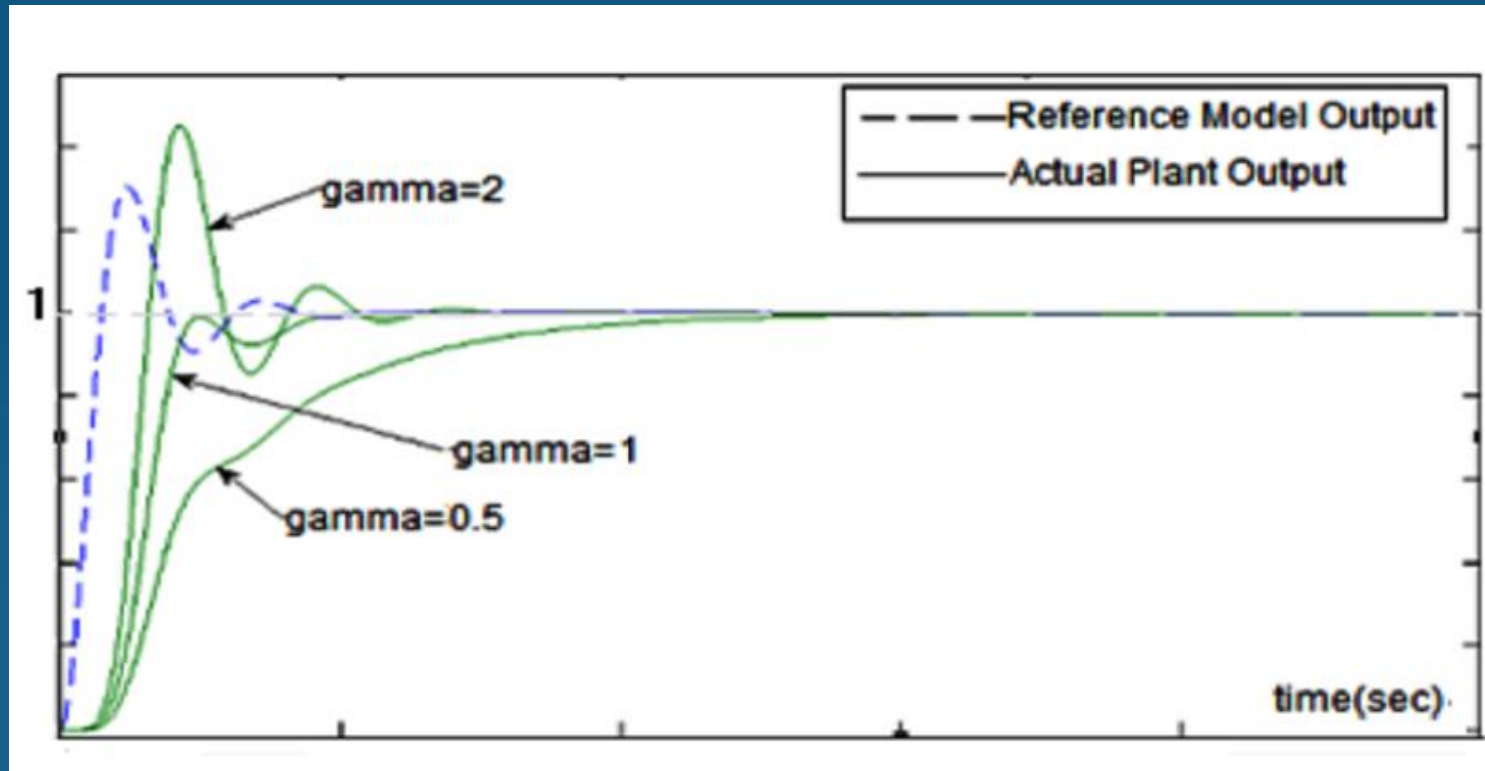
Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc : Co- Promotor

LATAR BELAKANG

1. Penggunaan BLDC meningkat pesat sehingga berpotensi menjadi arus utama transmisi daya di industri dan otomotif
2. Perubahan parameter motor serta adanya gangguan menyebabkan respon motor menjadi lambat dengan amplitudo besar dan berisolasi. Sehingga performance sistem menjadi tidak stabil.
3. Kendali MRAC dapat mempercepat respon sistem dalam menangani kondisi variasi parameter dan perubahan lingkungan, Namun masih terdapat overshoot dengan frekuensi osilasi

Rumusan Masalah

1. Pada kontrol MRAC, besarnya nilai gain adaptasi akan mempercepat respon mencapai keadaan steady state, tetapi mengalami overshoot yang besar dan berisolasi, sementara nilai gain adaptif yang kecil, akan melambatkan respon sistem, tetapi overshoot kecil dengan frekuensi isolasi yang sedikit.
2. Akan terjadi overshoot tinggi dan respon sistem yang sangat lambat jika terjadi perubahan parameter yang besar dan gangguan eksternal secara bersamaan pada motor BLDC



TUJUAN PENELITIAN

Desain Kendali PID adaptif dengan modifikasi Algoritma MRAC dan penambahan Regulator PI pada struktur PID adaptif yang dapat mempercepat respon sekaligus meminimalisir amplitudo besar dan osilasi frekuensi saat terjadi perubahan parameter yang besar dan gangguan eksternal secara bersamaan pada sistem

HIPOTESIS AWAL

Penambahan dan Penguatan parameter adaptasi serta penambahan kendali PI sebagai compensator pada struktur PID adaptif mampu mempercepat respon sistem dan mengurangi overshoot dan osilasi frekuensi secara signifikan

KONTRIBUSI PENELITIAN

1. **Mendukung akselerasi dalam pengembangan kendaraan listrik di Indonesia sesuai Perpres No. 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (Battery Electric Vehicle) untuk Transportasi Jalan.**
2. **Penghematan energi . 40 % listrik industri di konsumsi motor listrik termasuk BLDC. Dengan Performance motor yang stabil, serapan energi listrik akan berkurang.**

PLANT : BRUSHLESS DC MOTOR BLDC

PERBANDINGAN MOTOR LISTRIK

MOTOR DC

Efisiensi Tinggi , karena tegangan DC pada rotor untuk menggerakkan motor

Biaya Perawatan tinggi , karena adanya Brush yang cepat mengalami kerusakan , saat berputar pada brush akan timbul arching akibat komutasi

MOTOR
INDUKSI

Biaya Perawatan rendah karena tidak memiliki brush

Efisiensi rendah, karena cepat panas , arus pada rotor menimbulkan disipasi daya

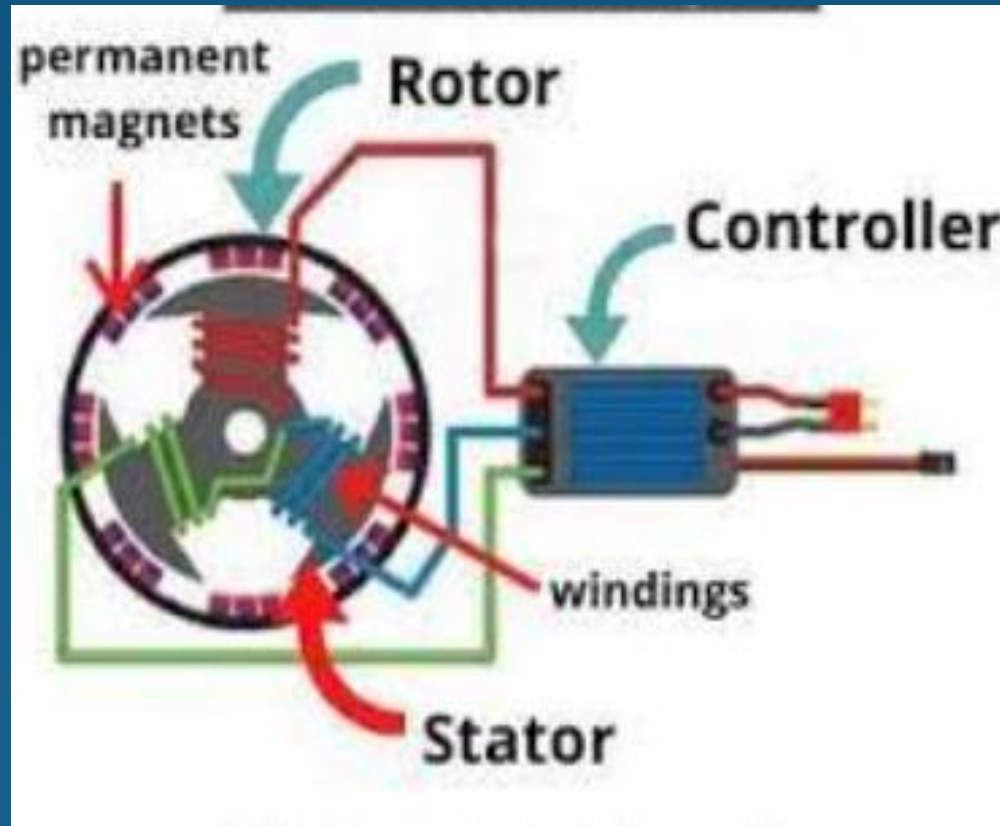
BLDC

EFISIENSI TINGGI, TORSI TINGGI, KECEPATAN TINGGI BIAYA PERAWATAN RENDAH

PENGENDALINYA KOMPLEKS DAN RUMIT

STRUKTUR BLDC

Rotor adalah bagian motor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator



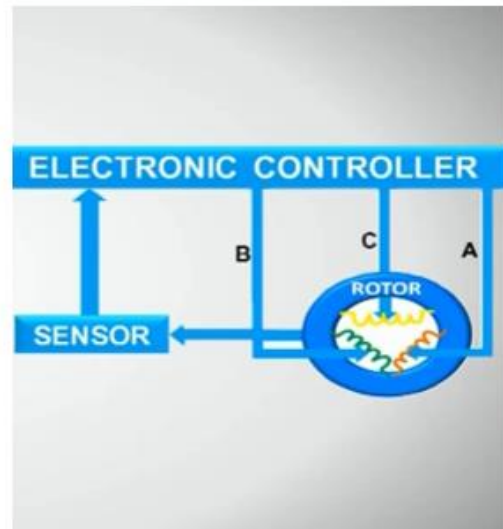
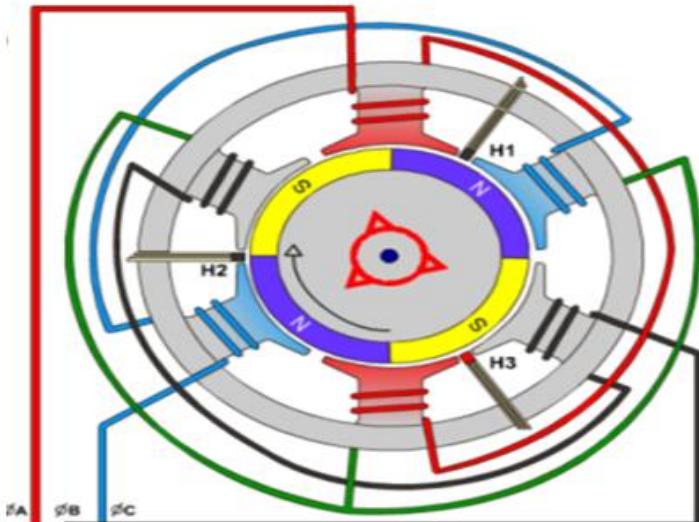
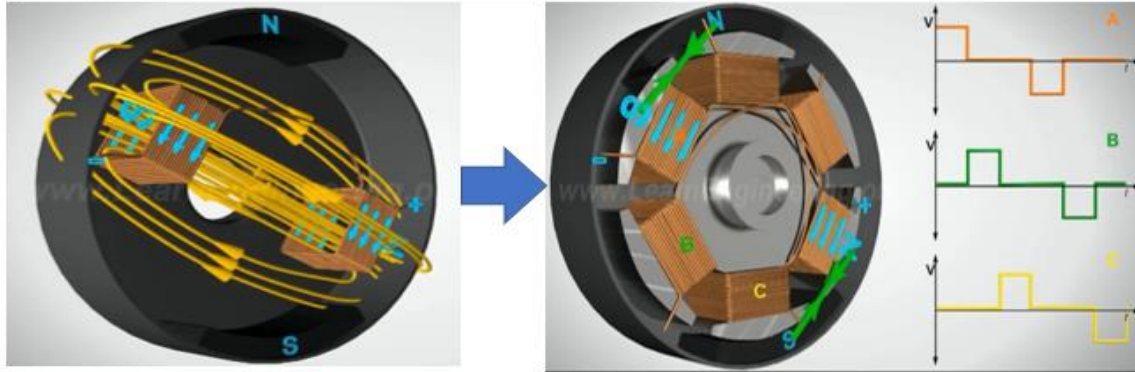
Stator adalah bagian motor yang diam/statis dimana fungsinya sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada rotor sehingga motor dapat berputar

Menentukan lilitan mana yang harus dialiri listrik agar motor dapat berputar. Dan berfungsi sebagai pengatur tegangan input pada motor, sehingga kecepatan putar motor dapat berubah-ubah sesuai keinginan pengguna



Sensor Hall memberikan informasi secara presisi kepada kontroler untuk mengatur lilitan mana yang harus dialiri listrik.

PRINSIP KERJA



Motor BLDC ini dapat bekerja ketika stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Akibat arus yang melewati kumparan pada stator timbul medan magnet (B). Karena arus yang diberikan berupa arus AC fasa, nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah – ubah setiap saat . Ketika motor berputar permanent magnet pada rotor bergerak melewati kumparan stator dan menginduksi potensial listrik dalam kumparan tersebut, maka terjadinya GGL . Aliran arus listrik berpindah dari fasa A+ ke B+ mengakibatkan kumparan dari A+ dan B+ menjadi kutup utara dan juga dan A- dan juga B- menjadi kutup selatan sehingga pada kondisi ini mengakibatkan rotor berputar karena ada gaya Tarik menarik antara perbedaan kutub.



KENDALI MRAC-MIT

Sistem kontrol konvensional

Tidak Mampu Efektif Menangani



Beban, inersia, dan gaya lain yang bekerja pada sistem berubah secara drastis.

Kemungkinan kesalahan tak terduga dan tiba-tiba.

Kemungkinan gangguan yang sering atau tidak terduga



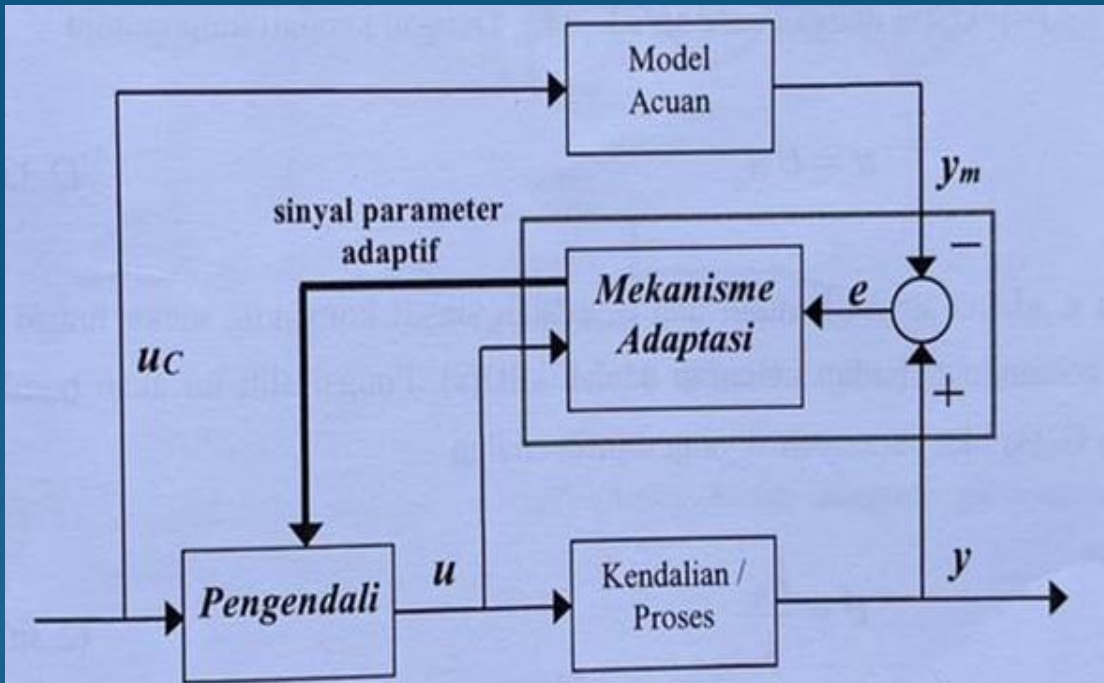
Efektif

SISTEM KONTROL ADAPTIF



Kontrol adaptif mengubah koefisien algoritma kontrol secara real time untuk mengkompensasi variasi lingkungan atau sistem itu sendiri. Ini juga memvariasikan fungsi transfer sistem sesuai dengan situasi.

MODEL REFERENCE ADAPTIF CONTROL (MRAC)



Model Acuan :

Ini digunakan untuk menentukan respons ideal dari sistem kontrol adaptif terhadap perintah eksternal. Perilaku ideal yang ditentukan oleh model referensi harus dapat dicapai untuk sistem kontrol adaptif

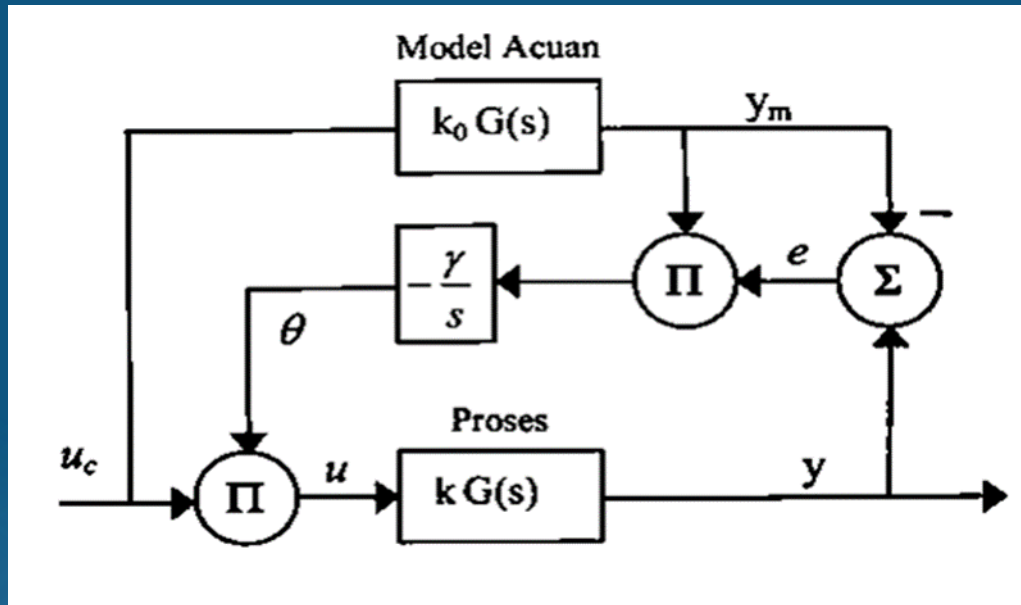
Mekanisme Adaptasi:

Digunakan untuk mengatur parameter dalam hukum kontrol. Hukum adaptasi mencari parameter sedemikian rupa sehingga respons Plant harus sama dengan model referensi



Institut Teknologi Massachusetts
(MIT Rule)

ATURAN INSTITUT TEKNOLOGI MASSACHUSETTS (MIT RULE)



Fungsi alih $kG(s)$, dimana $G(s)$ diketahui dan k tidak diketahui secara pasti, garis besar perancangan adalah menemukan kendali umpan maju yang dapat membuat proses $k G(s)$, mengikuti tanggapan fungsi alih Jadi dipaksakan agar sistem memenuhi kondisi :

$G_m(s)(s) = k_0 G(s) = k G(s)$ dengan cara adaptasi :

Kendali Umpan maju :

$$U = \theta U_c$$

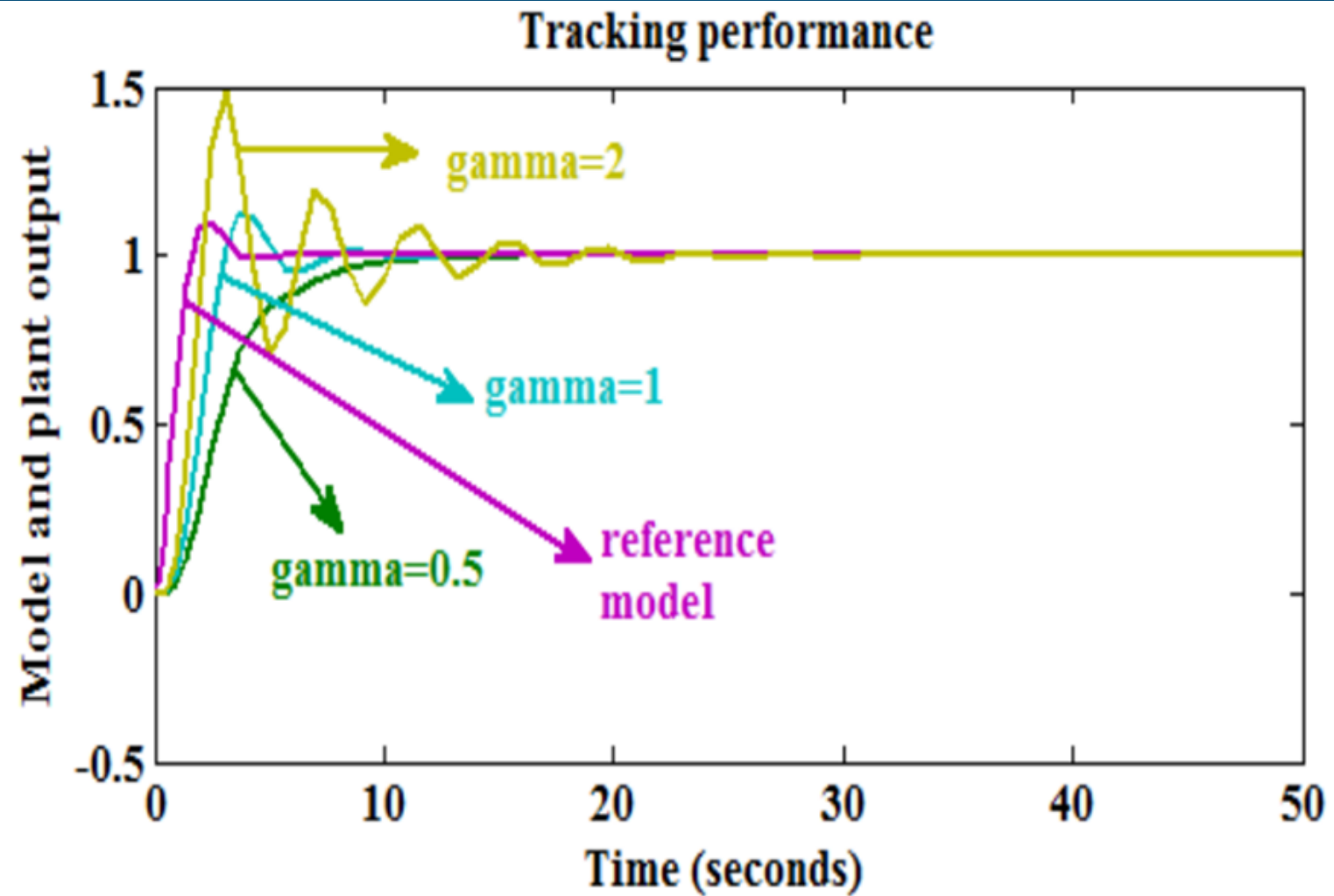
Pengaturan parameter dilakukan dengan meminimalkan fungsi kerugian (The loss function, $J(\theta)$)

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2$$

Agar J kecil dilakukan perubahan parameter pada gradien negatif dari J

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta}$$

turunan kepekaan (sensitivity derivative) sistem yang menunjukkan bagaimana error dipengaruhi oleh parameter yang dapat diukur (adjustable parameters).



STATE OF THE ART

Dalam tabel State of The Art di bawah ini.
Jurnal yang berkaitan dengan sistem kontrol BLDC dengan berbagai metode sistem kontrol

REF	METODE KENDALI	KEKURANGAN PENELITIAN
[17], [18], [23], [3], [27].	optimasi Proporsional Integral Derivative (PID) dengan algoritma kontrol.	Parameter PID tetap sehingga belum mampu stabil dalam kondisi non linier dan pada perubahan kondisi dan beban yang mendadak Sistem juga belum mampu mempertahankan kecepatan yang mendekati kecepatan konstan .
[19],[20],[22],[25]	hybrid PID Logika Fuzzy (PID-Fuzzy).	Drive BLDC memberikan kinerja yang lebih baik jika beban diubah secara bertahap, tetapi belum maksimal ketika beban diubah secara mendadak , sudah mampu meningkatkan kinerja dalam kondisi steady state, tetapi masih diperlukan upaya lagi untuk peningkatan performance motor BLDC. FLC memiliki beberapa kesulitan saat merancang basis aturan dan pemilihan, fungsi keanggotaan, sementara Efisiensi pengontrol yang diusulkan bergantung pada pemilihan fungsi keanggotaan fuzzy, aturan fuzzy dan faktor penskalaan input dan output dari pengontrol
[28],[8], [29], [30].	menggabungkan PID-Fuzzy-adaptif	Model secara efektif mampu mengontrol respons sistem, tetapi tetapi keluaran sistem memiliki overshoot , undershoot serta noise yang lebih besar selama gangguan beban mendadak
[21],[31].	hybrid antara model cerdas dan Fuzzy	Kekurangan penelitian adalah konsep algoritma dan komputasi agak rumit, membutuhkan kapasitas komputasi dan ruang penyimpanan data yang lebih besar
[24].	Umpan BalikKeadaan	Respon lambat masih terjadi overshoot jika ada perubahan yang mendadak

Dari table terlihat bahwa algoritma kendali adaptif mampu membuat sistem tetap stabil jika terjadi kecepatan mendadak walaupun masih terdapat overshoot dan berisolasi. overshoot berada di $> 10\%$ dengan skenario ada perubahan beban dan kecepatan mendadak

State of the Art terkait kendali adaptif MRAC-MIT

Ref	Metode Penelitian	Skenario	Kondisi
[38],[10], [44]	MRAC, menggunakan 1 gain adaptasi dengan metode variasi nilai gain adaptasi	Kestabilan sistem terhadap gangguan yang muncul tiba-tiba dengan perubahan beban	Overshoot sistem berada $> 10 \%$
[11]	MRAC menggunakan 1 gain adaptasi metode variasi nilai gain adaptasi	Kestabilan sistem terhadap gangguan yang muncul tiba-tiba tanpa beban	Overshoot sistem berada $< 10 \%$
[41]	MRAC, Menggunakan 2 gain adaptasi dengan metode variasi nilai gain dengan skenario kestabilan sistem terhadap gangguan yang muncul tiba-tiba dengan perubahan	Perubahan beban	overshoot $> 10 \%$ tetapi masih lebih baik dengan menggunakan 1 gain adaptasi (perubahan beban) dan Overshoot $< 10 \%$ (tanpa beban)
[40],[42],[12],[13]	Penggunaan, PID untuk memperkuat Model referensi	Terhadap gangguan yang muncul tiba-tiba dengan perubahan beban	overshoot $< 10 \%$

Dari tabel menunjukkan bahwa nilai gain adaptasi memiliki pengaruh besar terhadap pengendalian MRAC. Performansi respons sistem dalam mengikuti respons model referensi sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai gain adaptasi.

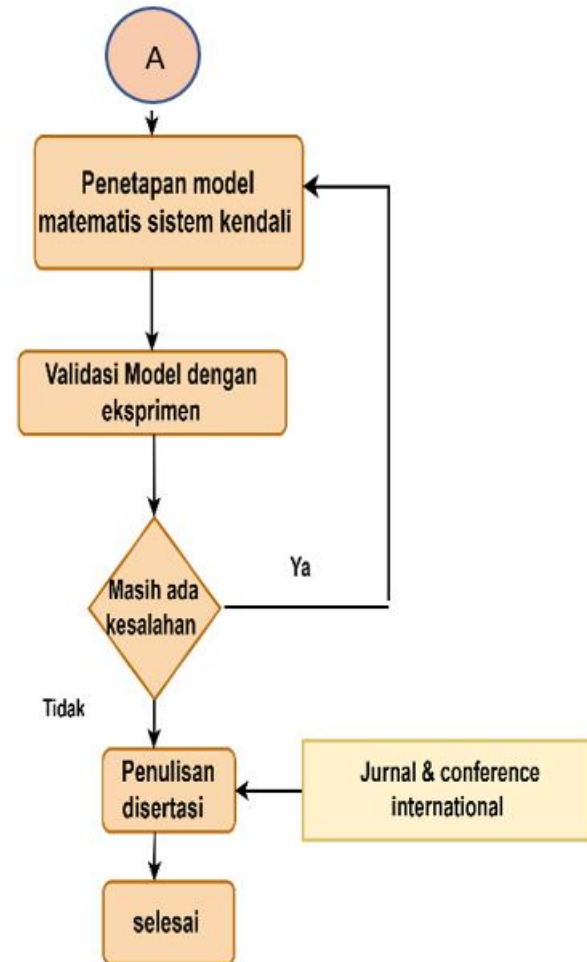
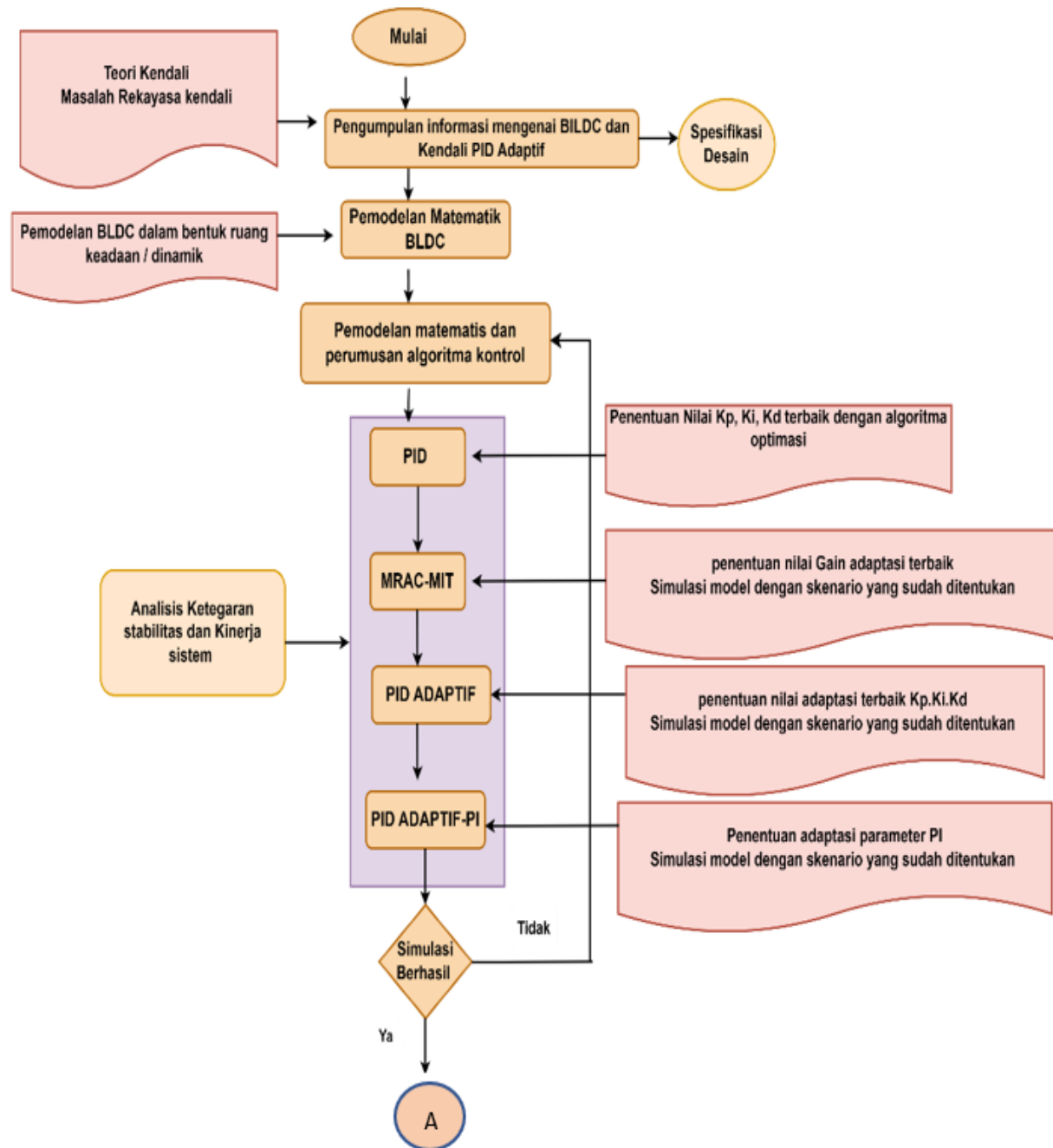
Nilai gain adaptasi yang berbeda menghasilkan respons sistem yang berbeda dalam mengikuti modelnya.

Dari semua tabel terlihat bahwa semua skenario penelitian hanya menunjukkan pengaruh model algoritma jika terdapat perubahan beban, torsi dan variasi kecepatan.

Belum ditemukan penelitian yang membuat skenario jika ada perubahan parameter motor yang besar dan gangguan acak secara bersamaan, bagaimana algoritma kendali mampu tetap stabil dalam kondisi tersebut.

Usulan penelitian adalah memodifikasi algoritma MRAC dengan normalisasi aturan adaptif, 3 penguatan gain adaptasi ditambahkan di struktur PID adaptif, kemudian PI sebagai kompensator dirancang untuk membuat sistem loop tertutup kuat ketika variasi parameter yang besar dan gangguan eksternal yang tiba-tiba terjadi secara bersamaan. Algoritma kendali akan menjaga persentase overshoot dari sistem loop tertutup di bawah 10% dan waktu pemulihannya untuk variasi parameter yang tiba-tiba lebih rendah dari 5 detik, yang merupakan kelebihan dibandingkan dengan pengontrol adaptif lainnya yang ditinjau.

TAHAPAN PENELITIAN



RANCANGAN PENELITIAN

Tahap pemodelan

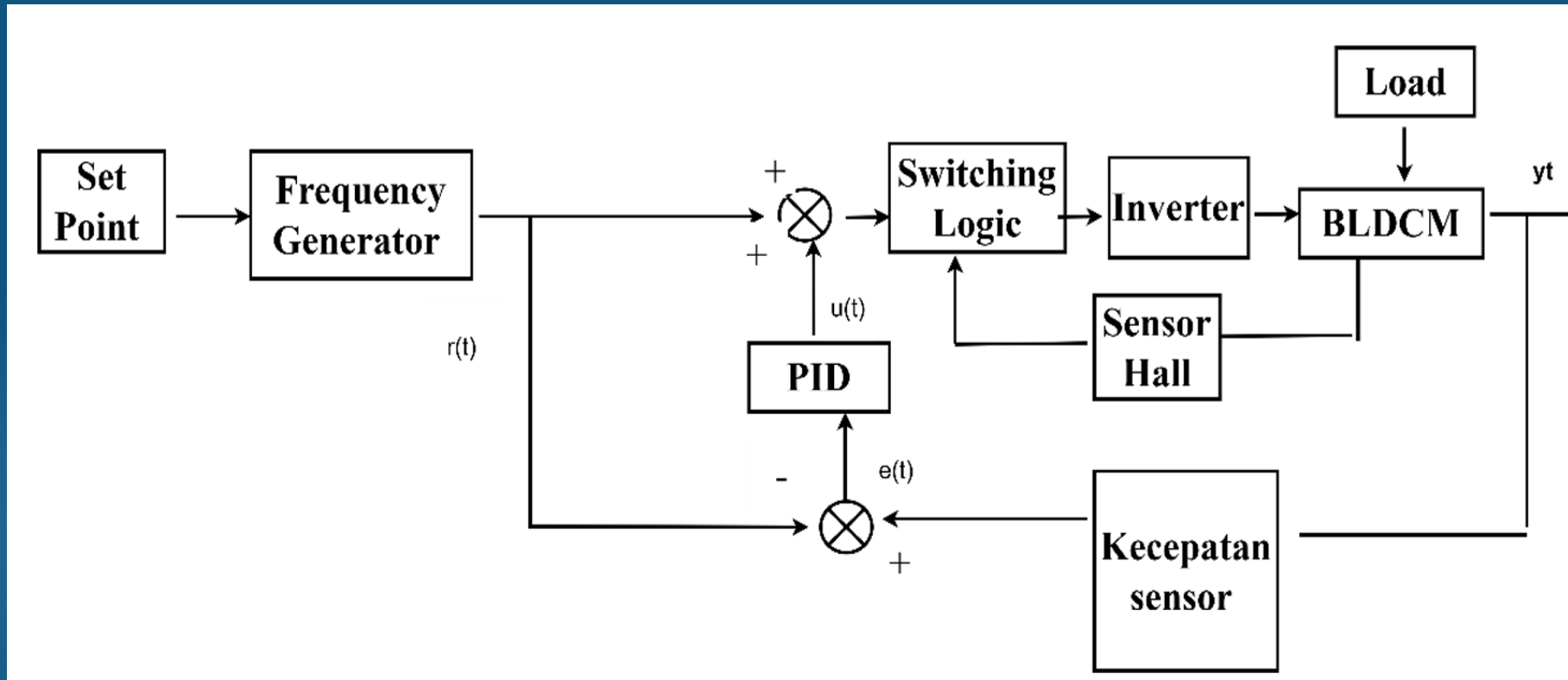
DALAM RANCANGAN INI AKAN DILAKUKAN TAHAP PEMODELAN YAITU :

Control kecepatan BLDC dengan PID. Model ini menyajikan teknik optimasi untuk menentukan parameter pengontrol (PID) untuk kontrol kecepatan motor

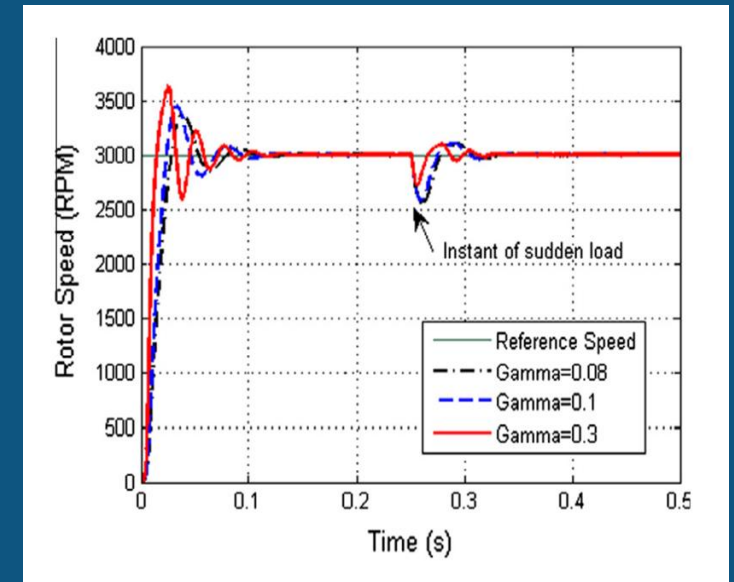
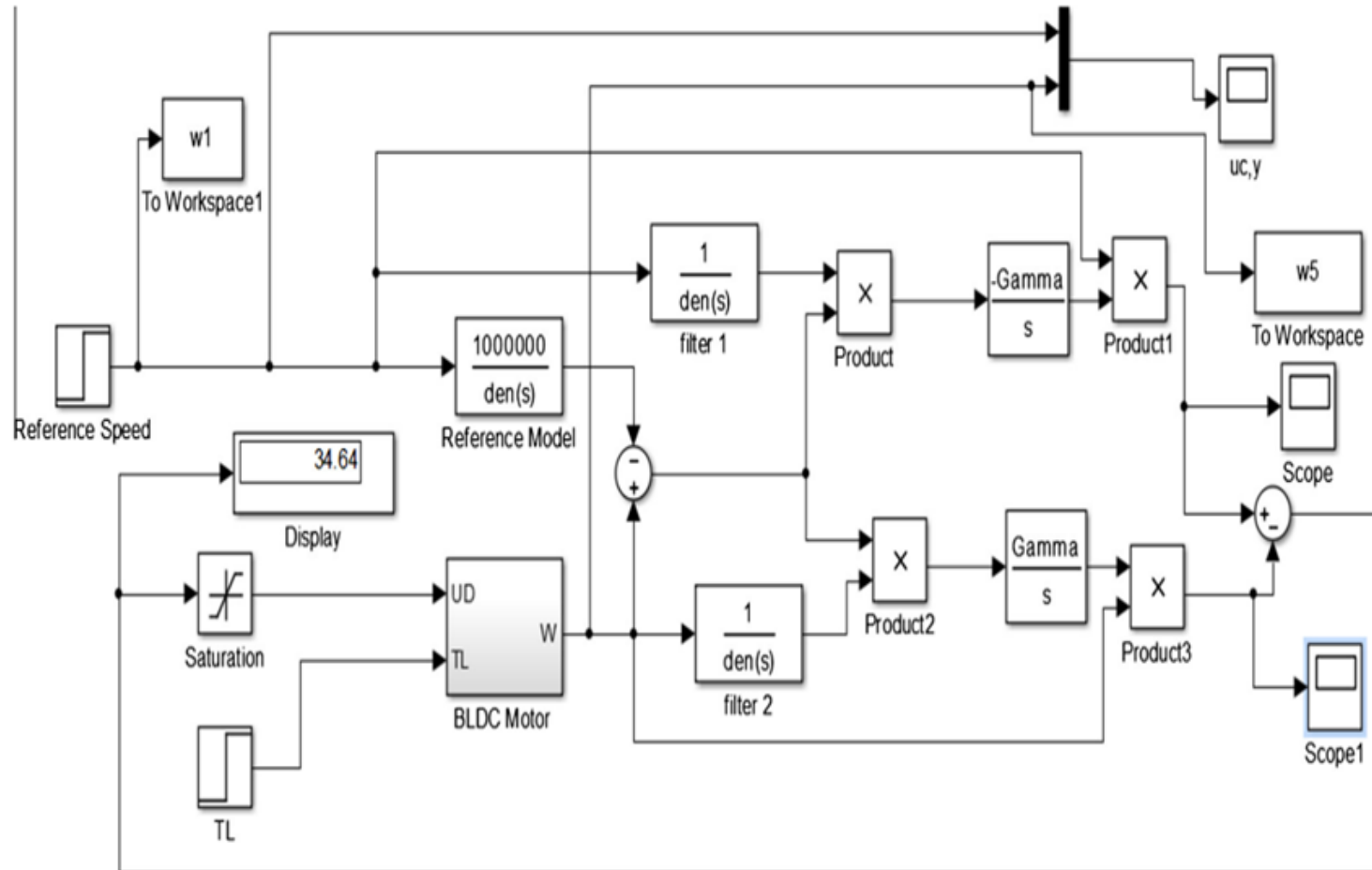
Model PID adaptif, Model ini menyajikan teknik mengadaftifkan PID control dalam mekanisme Adaptif Reference Adaptive Control (MRAC) dengan aturan MIT Rule Modifikasi

Model PID adaptif Model ini menyajikan teknik mengadaftifkan PID control dalam mekanisme Adaptif Reference Adaptive Control (MRAC) dengan aturan MIT Rule Modifikasi dengan Regulator PI

Control kecepatan BLDC dengan PID

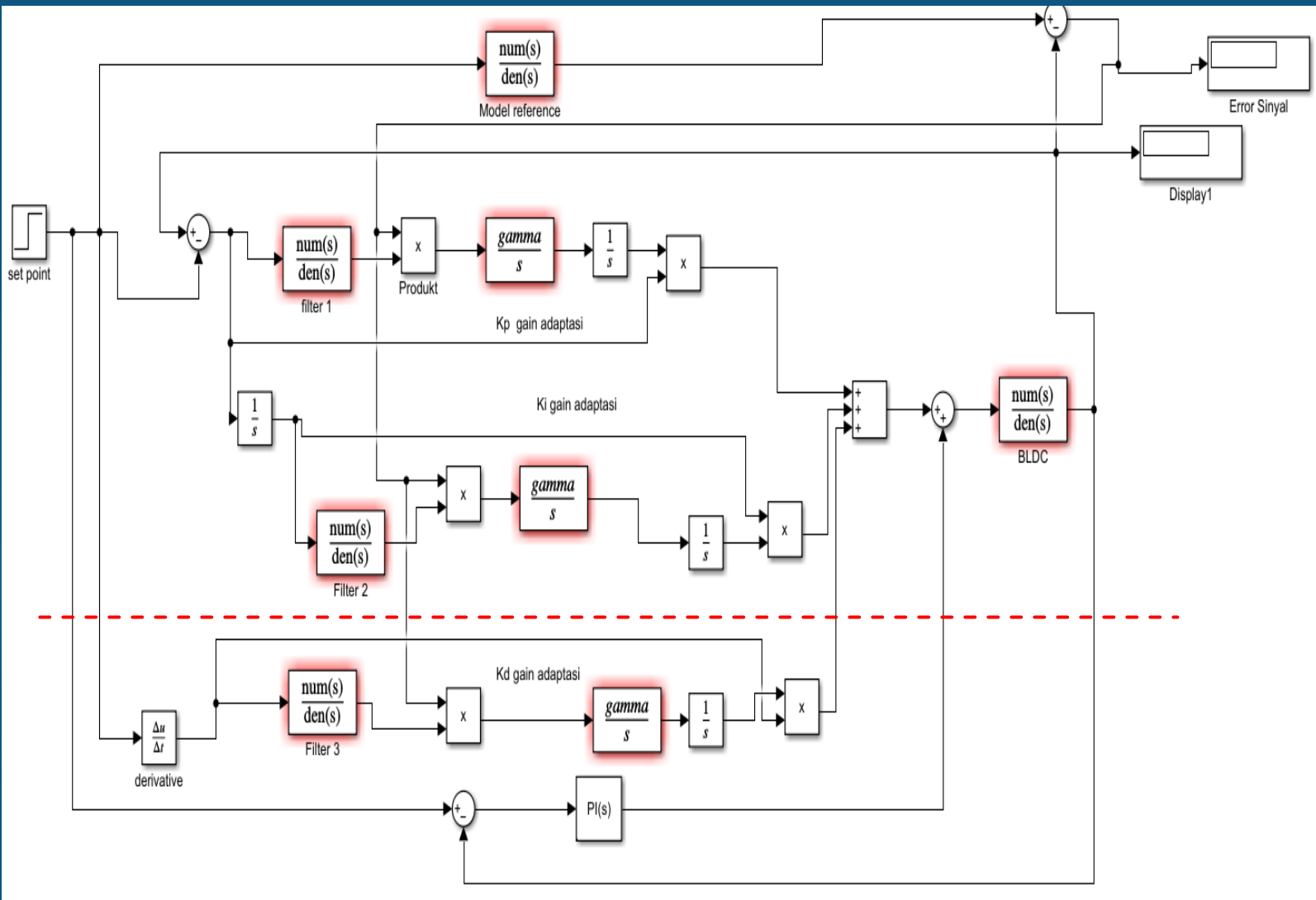


MODEL RUJUKAN



Skema Kontrol Model Reference Adaptif (MRAC) Rujukan [40]

Usulan Model PID Adaptif Model Skema MRAC Dengan Regulator PI



Pada desain ini filter θ_1 , θ_2 , dan θ_3 dibuat menyerupai fungsi alih model referensi, karena filter harus menyaring keluaran y_{plant} agar mengikuti keluaran model referensi. Perubahan parameter kendali tidak secara langsung terlihat di aturan adaptasi, tetapi hanya bisa di lihat pada isyarat kesalahan, digunakan sebagai syarat umpan balik, untuk memberikan perubahan isyarat kendali, yang selanjutnya akan mengoreksi kesalahan tadi. Jadi secara implisit aturan kendali adaptif digunakan untuk memaksakan kendalian agar mengikuti perilaku model acuan.

Tiga penguatan adaptif disertakan untuk menjamin stabilitas dan ketahanan sistem loop tertutup. Kendali PI digunakan untuk untuk mereduksi Amplitudo yang besar. Konstanta yang menonjol itulah akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan

SKENARIO PENELITIAN

SKENARIO SIMULASI

1. Tidak ada variasi parameter
2. Variasi parameter yaitu Pengaturan kecepatan pada variasi parameter
 - a. Gangguan kecepatan dalam waktu singkat, Kecepatan motor akan ditingkatkan 10 % dalam rentang waktu 0,25 detik
 - b. Perubahan mendadak dalam resistansi fase, resistansi akan diturunkan 10 % dalam rentang waktu 0,25 detik
 - c. Efek perubahan resistansi fasa dan inersia rotor, hambatan fasa dan inersia motor BLDC akan meningkat secara bersamaan sebesar 50% dari nilai aslinya.
 - d. Pelacakan kecepatan, untuk melihat kecepatan respon pada setiap kecepatan
3. Simulasi sistem loop tertutup ketika terjadi variasi beban yaitu pengaturan kecepatan pada variasi beban (diamati arus dan karakteristik torsi)
 - a. Kecepatan Referensi Tetap Tanpa Beban dan dengan beban.
 - b. Kecepatan referensi berubah tanpa beban dan dengan beban.
4. Kecepatan referensi tetap dengan perubahan beban pada waktu tertentu.
5. Kecepatan Referensi berubah Tanpa Beban dan dengan beban.
6. Gangguan acak berkekuatan 0,8 magnitudo dan frekuensi 0,1 Hertz terjadi pada keluaran plant pada skenario variasi parameter

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Viswanathan, V., Jeevananthan, S., 2015. Approach for torque ripple reduction for brushless DC motor based on three-level ne point-clamped inverter with DC–DC converter. *IET Power Electron.* 8 (1), 47–55
- [2] D. Mohanraj et al., "A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54833-54869, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3175011.
- [3] Devendra Potnuru, Alice Mary K., Saibabu Ch., Design and implementation methodology for rapid control prototyping of closed loop speed control for BLDC motor, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, Volume 5, Issue 1, 2018, Page 111, ISSN 2314-7172, <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.12.005>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2314717216301118>)
- [4] Bapayya Naidu Kommula, Venkata Reddy Kota, "Performance Evaluation of Hybrid Fuzzy PI Speed Controller for Brushless Motor for Electric Vehicle Application", *IEEE Conference on Power, Control, Communication and Computational Technology for Sustainable Growth (PCCCTSG)*, Dec. 2015
- [5] Madhusudan Singh, Archana Garg, "Performance Evaluation of BLDC Motor with Conventional PI and Fuzzy Speed Control", *IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Dec. 2012
- [6] Merve Yildirim, Mehmet Polat, Hasan Kürüm, "A Survey On Comparison Of Electric Motor Types And Drives Used For Electric Vehicles", *IEEE 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, Turkey, Sept. 2014)
- [7] S. Sakunthala, R. Kiranmayi, and P. N. Mandadi, "A study on industrial motor drives: Comparison and applications of PMSM BLDC motor drives," in *Proc. Int. Conf. Energy, Commun., Data Anal. Soft Comput. (ICECDS)*, Aug. 2017, pp. 537–540, doi: 10.1109/ICECDS.2017.8390224
- [8] A. A. El-samahy and M. A. Shamseldin, "Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control," *Ain Shams Eng. J.*, 2016.
- [9] Faisal Arya Samman, *Sistem Kendali Adaptif, Desain Pemodelan dan Simulasi Analog: IESTA*. 2016
- [10] M. S. Thasneem and G. K. Shalu, "Speed Control of Brushless DC Motor Using Model Reference Adaptive Control," *Int. J. A Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, vol. 6, no. 5, pp. 3258–3266, 2017, doi: 10.15662/IJAREEIE.2017.0605012.
- [11] A. Akbar, "Referensi Model Kontrol Adaptif untuk Motor DC Berdasarkan Simulink," pp. 13–18, 2016.
- [12] M. A. Shamseldin, M. Abdullah Eissa, and A. A. El-Samahy, "A Modified Model Reference Adaptive Controller for Brushless Motor," *17th Int. Middle East Power Syst. Conf.*, 2015.
- [13] M. Mahmud, S. M. A. Motakabber, A. H. M. Zahirul Alam, and A. N. Nordin, "Adaptive PID Controller Using for Speed Control of the BLDC Motor," *IEEE Int. Conf. Semicond. Electron. Proceedings, ICSE*, vol. 2020-July, pp. 168–171, 2020, doi: 10.1109/ICSE49846.2020.9166883.
- [14] U. Saranya and S. A. S. Allirani, "Model Reference Adaptive System based Speed Sensorless Control of Induction Motor using Fuzzy-PI Controller," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 110, no. 5, pp. 23–28, 2015
- [15] A. A. El-samahy and M. A. Shamseldin, "Brushless DC Motor Tracking Control Using Self-Tuning Fuzzy PID Control and Model Reference Adaptive Control," *Ain Shams Eng. J.*, 2016.

- [16] Jain P. Design of a model reference adaptive controller using modified MIT rule for a second order system. *Adv Electron Elect Eng* 2013;3:477–84.
- [17] D.Potnuru, K. A. Mary, and C. S. Babu, “Experimental implementation of Flower Pollination Algorithm for speed controller of BLDC motor,” *Ain Shams Engineering Journal*. Elsevier
- [18] S. Ekinici, B. Hekimoğlu, and D. Izci, “Opposition based Henry gas solubility optimization as a novel algorithm for PID control of DC motor,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*. Elsevier, 2021, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098620304985>
- [19] A. Varshney, D. Gupta, and B. Dwivedi, “Speed response of brushless DC motor using fuzzy PID controller under varying load condition,” *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. Elsevier, 2017, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2314717217300077>
- [20] K. Premkumar, B.V. Manikandan, Bat algorithm optimized fuzzy PD based speed controller for brushless direct current motor, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Volume 19, Issue 2, 2016, Pages 818-840, ISSN 2215-0986, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.11.004>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098615001676>)
- [21] Tariku Sinshaw Tamir, Gang Xiong, Zhen Shen, Xiaoyan Gong, Sheng Liu, Ehtisham Lodhi, Li Wan, Xisong Dong, Comparison and Study of Four Speed Controllers of Brushless DC Motors for Industrial Applications, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 53, Issue 5, 2020, Pages 59-64, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.04.124>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896321002366>)
- [22] Devendra Somwanshi, Mahesh Bundeale, Gaurav Kumar, Gajal Parashar, Comparison of Fuzzy-PID and PID Controller for Speed Control of DC Motor using LabVIEW, *Procedia Computer Science*, Volume 152, 2019, Pages 252-260, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.05.019>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919306702>)
- [23] V. Rajs, N. L. Rašević, M. Z. Bodić, M. M. Zuković, and ..., “PID Controller Design for Motor Speed Regulation with Linear and Non-Linear Load,” *IFAC-PapersOnLine*, 2022, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322003524>.
- [24] V. Sankardoss, P. Geethanjali, Parameter estimation and speed control of a PMDC motor used in wheelchair, *Energy Procedia*, Volume 117, 2017, Pages 345-352, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.142>
- [25] K. Premkumar, B.V. Manikandan, Fuzzy PID supervised online ANFIS based speed controller for brushless dc motor, *Neurocomputing*, Volume 157, 2015, Pages 76-90, ISSN 0925-2312, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.01.032>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231215000533>)
- [26] E Gowthaman, V Vinodhini, Mir Yasser Hussain, S.K. Dhinakaran, T Sabarinathan, Speed Control of Permanent Magnet Brushless DC Motor Using Hybrid Fuzzy Proportional plus Integral plus Derivative Controller, *Energy Procedia*, Volume 117, 2017, Pages 1101-1108, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.142>

- [27] H.E.A. Ibrahim, F.N. Hassan, Anas O. Shomer, Optimal PID control of a brushless DC motor using PSO and BF techniques, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 5, Issue 2, 2014, Pages 391-398, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.09.009>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447913000993>)
- [28] Shamseldin MA, El-samahy AA. Speed control of BLDC motor by using PID control and self-tuning fuzzy PID controller. 15th World Res Educ Mechatron 2014.
- [29] Aydogan Savran, Gokalp Kahraman, A fuzzy model based adaptive PID controller design for nonlinear and uncertain processes *ISA Trans.* 53 (2014) 280–288.
- [30] Maher Mahmoud Abdo, Ahmad Reza Vali, Ali Reza Toloei, Mohammad Reza Arvan, Stabilization loop of a two axes gimbal system using self-tuning PID type fuzzy controller, *ISA Trans.* 53 (2014) 591–602.
- [31] Mansouri, M.; Kaboli, S.H.A.; Ahmadian, J.; Selvaraj, J., A hybrid neuro-fuzzy—P. I. speed controller for B.L.D.C. enriched with an integral steady state error eliminator, in: *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*, 2012, vol., no., pp. 234, 237, 23–25 Nov. 2012, doi:10.1109/ICCSCE.2012.6487147
- [32] D.Potnuru, K. A. Mary, and C. S. Babu, “Experimental implementation of Flower Pollination Algorithm for speed controller of BLDC motor,” *Ain Shams Engineering Journal*. Elsevier, 2019, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447918300790>.
- [33] Akash Varshney, Deeksha Gupta, Bharti Dwivedi, Speed response of brushless DC motor using fuzzy PID controller under variable load condition, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, Volume 4, Issue 2, 2017, Pages 310-321, ISSN : 2314-7172, <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.12.014>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2314717217300077>)
- [33] *Procedia Manufacturing*, Volume 4, 2015, Pages 322-327, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.005> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978915011634>)
- [35] Devendra Potnuru, Alice Mary K., Saibabu Ch., Design and implementation methodology for rapid control prototyping of closed loop speed control for BLDC motor, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, Volume 5, Issue 1, 2018, Pages 99-111, ISSN 2314-7172, <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.12.005>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2314717216301118>)
- [36] M. Mahmud, S. M. A. Motakabber, A. H. M. Zahirul Alam and A. N. Nordin, "Adaptive PID Controller Using for Speed Control of the BLDC Motor," *2020 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE)*, 2020, pp. 168-171, doi: 10.1109/ICSE49846.2020.9166883.
- [37] Devendra Potnuru, K. Alice Mary, Ch. Sai Babu, Experimental implementation of Flower Pollination Algorithm for speed controller of a BLDC motor, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 10, Issue 2, 2019, Pages 287-295, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.07.005>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447918300790>)

- [38] M. Swathi and P. Ramesh, "Modeling and analysis of model reference adaptive control by using MIT and modified MIT rule for speed control of DC motor," *Proc. - 7th IEEE Int. Adv. Comput. Conf. IACC 2017*, pp. 482–486, 2017, doi: 10.1109/IACC.2017.0105.
- [39] S. Mallick and U. Mondal, "Performance study of different model reference adaptive control techniques applied to a DC motor speed control," *Proc. Int. Conf. Trends Electron. Informatics, ICOEI 2019*, no. Icoei, pp. 770–774, 2019, doi: 10.1109/ICOEI.2019.8862711.
- [40] A. A. El-samahy and M. A. Shamseldin, "Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, no. 3, pp. 341–352, 2018, doi: 10.1016/j.asej.2016.02.004
- [41] P. Swarnkar, S. Jain, and R. K. Nema, "Effect of Adaptation Gain in Model Reference Adaptive Controlled Second Order System," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 1, no. 3, pp. 70–75, 2011, doi: 10.48084/etasr.11.
- [42] R. J. Pawar and B. J. Parvat, "Design and implementation of MRAC and modified MRAC technique for inverted pendulum," *Int. Conf. Pervasive Comput. Adv. Commun. Technol. Appl. Soc. ICPC 2015*, vol. 00, no. c, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1109/PERVASIVE.2015.7087168.
- [43] R. Sengupta, U. M. Nath, and C. Dey, "Design and performance analysis of a modified MRAC for second-order processes," *2017 4th Int. Conf. Power, Control Embed. Syst. ICPCES 2017*, vol. 2017-January, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1109/ICPCES.2017.8117644
- [44] P. Ramesh and N. Yadaiah, "MRAC with variable adaptation gain for first order systems," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2017-December, pp. 585–590, 2017, doi: 10.1109/TENCON.2017.8227930.
- [45] N. Wang, "MRAC for Nonlinear Systems with Unknown Gain Signs and Unmodeled Dynamics," 2016.



TERIMA KASIH