

# ***SELF TUNING REGULATOR UNTUK SISTEM TAKSTABIL DAN TAKLINEAR PADA PROSES KEREKAYASAAN INDUSTRI KIMIA***

**Nugroho Sidik Haryanto<sup>1</sup>, Sugiarto<sup>2</sup>, Oni Yuliani<sup>3</sup>**

*Prodi Teknik Elektro, FTI, ITNY*

[\*nugrohosidik9@gmail.com\*](mailto:nugrohosidik9@gmail.com)

## *Abstrak*

*Pada industri (produksinya berkaitan dengan kimia), proses produksi umumnya menggunakan tangki yang bersifat interacting sebagai pemroses dan menyimpan hasil produk sementara. Pada proses pengemasan produk tersebut, referensi dari level permukaan tinggi tangki sering ke luar dari batas-ambangnyanya yang diakibatkan oleh gangguan dari sekeliling atau environment. Perubahan nilai referensi mengakibatkan parameter kontroler harus ditala-ulang dan melibatkan kendali adaptif. Self-Tuning Regulator (STR) yang memiliki komponen berupa estimator (berbasis algoritma Recursive Least Square) dan persamaan Diophantine merupakan salah satu kendali adaptif yang mampu menyelesaikan permasalahan tersebut. Simulator STR berbasis MATLAB dapat digunakan untuk meniru proses pengendalian. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa sistem kendali telah bekerja dengan baik dan mempunyai nilai settling time bernilai 3,6 p.u. (terhadap masukan berjenis tangga dengan magnituda 1 unit), bernilai maksimum 1,7 p.u. dan nilai minimum -1,7 p.u (terhadap masukan berjenis gelombang persegi dengan magnituda 1 unit) dan nilai luaran akan menyerupai masukan bila menggunakan masukan acak.*

*Kata Kunci : Self-Tuning Regulator , interacting tank, Recursive Least Square, Persamaan Diophantine*

## *Abstract*

*In industry (the production is related to chemicals), the production process generally uses an interacting tank as a processing and temporary storage of product results. In the process of packaging these products, the reference from the high surface level of the tank is often out of its limits due to disturbances from the surroundings or the environment. Changes in the reference value result in controller parameters having to be re-tuned and involve adaptive control. Self-Tuning Regulator (STR) which has components in the form of an estimator (based on the Recursive Least Square algorithm) and the Diophantine equation is one of the adaptive controls that can solve this problem. MATLAB-based STR simulators can be used to emulate control processes. The simulation results show that the control system has worked well and has a settling time value of 3.6 p.u. (against the input of a ladder type with a magnitude of 1 unit), the maximum value is 1.7 p.u. and a minimum value of -1.7 p.u (for a square wave input with a magnitude of 1 unit) and the output value will resemble the input when using random input.*

*Keyword : Self-Tuning Regulator , interacting tank, Recursive Least Square, Diophantine Equation*

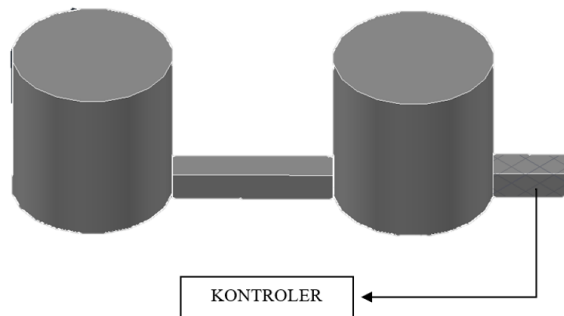
## **1. PENDAHULUAN**

Pada industri kimia sering kali menggunakan wadah untuk menyimpan bahan berupa fluida (teh, susu, soda) atau hasil produksi pada tangki dan jumlahnya lebih dari satu. Struktur tangki lebih dari satu dapat berupa non interacting tank dan interacting tank.

Untuk mengendalikan keluaran alir pada tangki-tangki biasanya dilakukan dengan kendali PID. Bila level terjadi perubahan maka kendali tersebut harus ditala ulang (parameter kendali), salah satu kendali yang dapat mengatur kendali PID yaitu didanamakan Teknik kendali adaptif (MRAC, Model Refrence Adaptive Control; Gain Scheduling ; STR, Self-Tuning Regulator).

Permasalahan yang mengharuskan mengubah kontroler (kendali adaptif) pada perubahan toleransi batas level (tinggi permukaan) interacting tank dan pemilihan kendali adaptif STR sebagai solusi dikarenakan STR diterapkan untuk mengembangkan akurasi pelacakan level ketinggian cairan pada sistem 2 tangki yang gabungan. Konfigurasi teknik identifikasi sistem digunakan untuk pada tangki 1 dan tangki 2, algoritma kendali level ketinggian cairan dapat diimplementasikan pada tangki tunggal dan tangki yang digabungkan dengan reference yang kompleks (Ayten dkk., 2017)

Selain itu, pengendalian level tangki (pada interacting tank) sangat sulit bila dimodelkan seperti dengan menggunakan MRAC dan gain scheduling. Tetapi pada STR bisa dikendalikan secara statistik menggunakan algoritma seperti RLS (Recursive Least Square) dan persamaan diophantine. RLS akan mengestimasi secara berulang pada nilai yang sudah diperbaharui dengan estimasi kuadrat terkecil (Lukman, 2004). Sedangkan persamaan Diophantine membuat penyelesaian dalam bentuk bilangan bulat (Shanah,2020) tetapi bisa saja melakukan penyelesaian dalam bentuk persamaan linier, kuadrat, dan matriks.

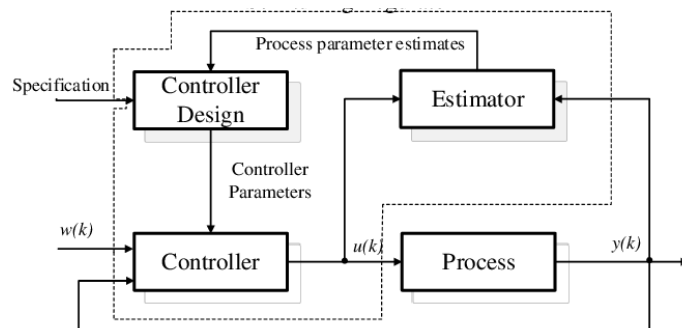


Gambar 1. Interacting tank dengan kendali

Paper ini disusun dalam 4 bagian yaitu metode penelitian dibahas pada bagian 2. Bagian 3 menjelaskan hasil dan analisis dari penelitian sedangkan bagian akhir membahas kesimpulan yang diikuti oleh pustaka.

## 2. METODE PENELITIAN

Sistem *self-tuning* telah menjadi merek dagang di industri kedirgantaraan, karena umpan balik semacam ini adalah diperlukan untuk menghasilkan kontrol multivariabel linier yang optimal proses. Diagram blok regulator self-tuning ditunjukkan pada Gambar 1. Self-Tuning Regulator terdiri dari dua kalang. Kalang-dalam terdiri dari atas proses dan umpan balik biasa kontroler. Kalang-luar terdiri atas parameter estimator rekursif.



Gambar 2. Diagram kotak self-tuning regulator

Blok bernama "estimator" menunjukkan estimasi on-line parameter proses menggunakan algoritma kuadrat terkecil rekursif. Blok bernama "desain kontroler" mewakili on-line solusi untuk merancang masalah untuk sistem dengan parameter yang diketahui atau dengan parameter yang diestimasi. Blok bernama "kontroler" adalah digunakan untuk menghitung aksi kontrol dengan kontroler parameter dihitung oleh blok prosesnya (Åström, 1975).

Skema STR termasuk indirect adaptive controller Pada indirect adaptive controller, estimasi dari parameter-parameter proses secara terus-menerus di-update dan parameter pengendali didapatkan dari solusi dengan menggunakan parameter yang diestimasi. Parameter pengendali diatur oleh kalang yang terdapat di bagian luar, yang terdiri dari blok estimasi parameter dan blok perhitungan desain pengendali. Pada skema STR, parameter pengendali atau parameter proses diestimasi secara real-time (Fitriyanto, 2011).

Perbedaan antara indirect self-tuning regulator dengan direct self-tuning regulator yaitu indirect self-tuning regulator merupakan metode kendali yang digunakan untuk mengidentifikasi parameter sistem yang tidak diketahui, kemudian transfer fungsi kendali akan diekstraksi oleh model. Sedangkan direct self-tuning regulator merupakan sebuah metode kendali yang mengidentifikasi kendali tanpa mengidentifikasi pada parameter sistem (Hajizadeh Dkk, 2014).

Metode *least square* biasanya digunakan dalam sistem identifikasi. Prinsipnya adalah bahwa parameter yang tidak diketahui dari model matematika harus dipilih dengan meminimalkan jumlah dari kuadrat perbedaan antara yang benar-benar diamati dan nilai keluaran yang diprediksi secara analitis dengan kemungkinan pembobotan yang mengukur tingkat presisi. Pada sistem kendali adaptif pengamatan diperoleh berurutan secara *real time*. Algoritma estimasi rekursif adalah diinginkan. Algoritma tersebut menghemat waktu komputasi dengan menggunakan hasil diperoleh pada waktu  $t-1$  untuk mendapatkan estimasi pada waktu  $t$ . Oleh karena itu, Metode estimasi *recursive least square* (RLS) dapat digunakan.

Diasumsikan bahwa proses dijelaskan oleh sistem masukan tunggal dan luaran tunggal atau SISO.

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})(u(t - d_0) + v(t - d_0)) \quad (1)$$

dengan  $A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}$  dan  $B(z^{-1}) = 1 + b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m}$ .

Memakai indeks  $m = n - d_0$ ,  $y$  adalah luaran,  $u$  adalah masukan dari sistem dan  $v$  menyatakan gangguan. Gangguan tersebut dapat masuk ke dalam sistem melalui banyak cara. Di sini diasumsikan bahwa  $v$  masuk pada masukan proses. Estimator RLS dinyatakan oleh

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k - 1) + K[y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k - 1)] \quad (2)$$

$$K(k) = P(k - 1)\varphi(k) \left( I + \hat{\theta}(k - 1) \right)^{-1} \quad (3)$$

$$P(k) = \left( I - K(k)\varphi^T(k) \right) P(k - 1) \quad (4)$$

Estimasi  $\hat{\theta}(k)$  diperoleh dengan menambahkan bentuk galat prediksi bobot  $y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k - 1)$  pada estimator sebelumnya  $\hat{\theta}(k - 1)$ . Bentuk  $\varphi^T(k)\hat{\theta}(k - 1)$  dapat dipandang sebagai nilai  $y$  pada waktu  $k$  yang diprediksi oleh model dengan estimator sebelumnya  $\hat{\theta}(k - 1)$  (Susanto, 2008). Parameter yang tidak diketahui  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \alpha_0, \alpha_1$  dan  $\alpha_2$  diestimasi dengan menggunakan algoritma RLS dan disimulasikan dalam bentuk diskrit.

Sebuah kontroler linier umum digambarkan sebagai

$$R(z^{-1})u(t) = T(z^{-1})u_c(t) - S(z^{-1})y(t) \quad (5)$$

Dengan  $R(z^{-1}), T(z^{-1})$  dan  $S(z^{-1})$  adalah polinomial dalam *back-shift operator*  $z^{-1}$ . Kontroler ini terdiri dari umpan balik dengan operator transfer  $\frac{T(z^{-1})}{R(z^{-1})}$  dan sebuah umpan balik dengan operator transfer  $\frac{S(z^{-1})}{R(z^{-1})}$ . Dengan demikian kontroler linear memiliki dua derajat kebebasan. Blok diagram sistem kalang tertutup ditunjukkan pada Gambar 2.4.

Karakteristik polinomial kalang tertutup direpresentasikan sebagai

$$A_c = AR + BS \quad (6)$$

Ide dasar dari desain kontroler adalah penentuan polinomial karakteristik kalang tertutup  $A_C$  yang diinginkan yang digunakan sebagai desain parameter. Dengan menyelesaikan persamaan Diophantine, polinomial  $R$  dan  $S$  dapat diperoleh. Karakteristik polinomial kalang tertutup  $A_C$  menentukan karakteristik dan kinerja sistem tertutup (Åström, 1975). Persamaan Diophantine selalu memiliki solusi jika polinomial  $A$  dan  $B$  bersifat ko-prima. Persamaan Diophantine dapat disederhanakan menjadi

$$AR + B^{-1}S = A_m A_o = A_C \quad (7)$$

Untuk memiliki aturan kendali yang causa dalam kasus waktu diskrit, dilakukan pemaksaan kondisi berikut pada polinomial dalam aturan kendali

$$\deg S \leq \deg R \quad (8)$$

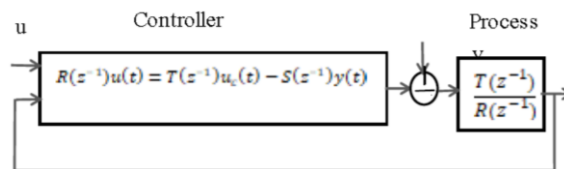
$$\deg T \leq \deg R \quad (9)$$

Kondisi  $\deg S \leq \deg R$  tersebut menyiratkan bahwa

$$\deg A_C \geq 2 \deg A - 1 \quad (10)$$

Kondisi  $\deg T \leq \deg R$  tersebut menyiratkan bahwa

$$\deg A_m - \deg B \geq \deg A - \deg B = d_0 \quad (11)$$



Gambar 3. Diagram blok kontroler linear

Kendali ini bekerja baik bila sudah memenuhi *simple criteria* dari kendalinya, seperti *rise time*, *overshoot*, *percentage error*, dan *settling time*. Adapun penjelasan terkait *simple criteria* sebagai berikut (Bolton, 2002) :

A. *Rise time*

*Rise time* merupakan waktu yang diambil dari respon  $x$  hingga naik menuju nilai 0 pada nilai *steady state*, ini merupakan waktu dimana respon beresilasi untuk menyelesaikan seperempat siklus aksi kendali. Terkadang *rise time* ditentukan berdasarkan waktu respon naik dari 10% hingga 90% dari nilai *steady state*.

B. *Overshoot*

*Overshoot* merupakan jumlah maksimum yang mana respons melebihi nilai dari *steady state*, dengan memperhatikan amplitudo puncak pertama dalam grafik aksi kendalinya. *Overshoot* sering dituliskan sebagai persentase dari nilai *steady state*. *Overshoot* tidak bergantung dari frekuensi sistem tetapi hanya pada faktor redaman, sebagai faktor redaman yang mendekati nilai 1 sehingga persentase *overshoot*-nya berada pada nilai mendekati angka nol. Adapun tabel nilai terkait persentase dari *overshoot* untuk rasio terhadap redaman tertentu sebagai berikut.

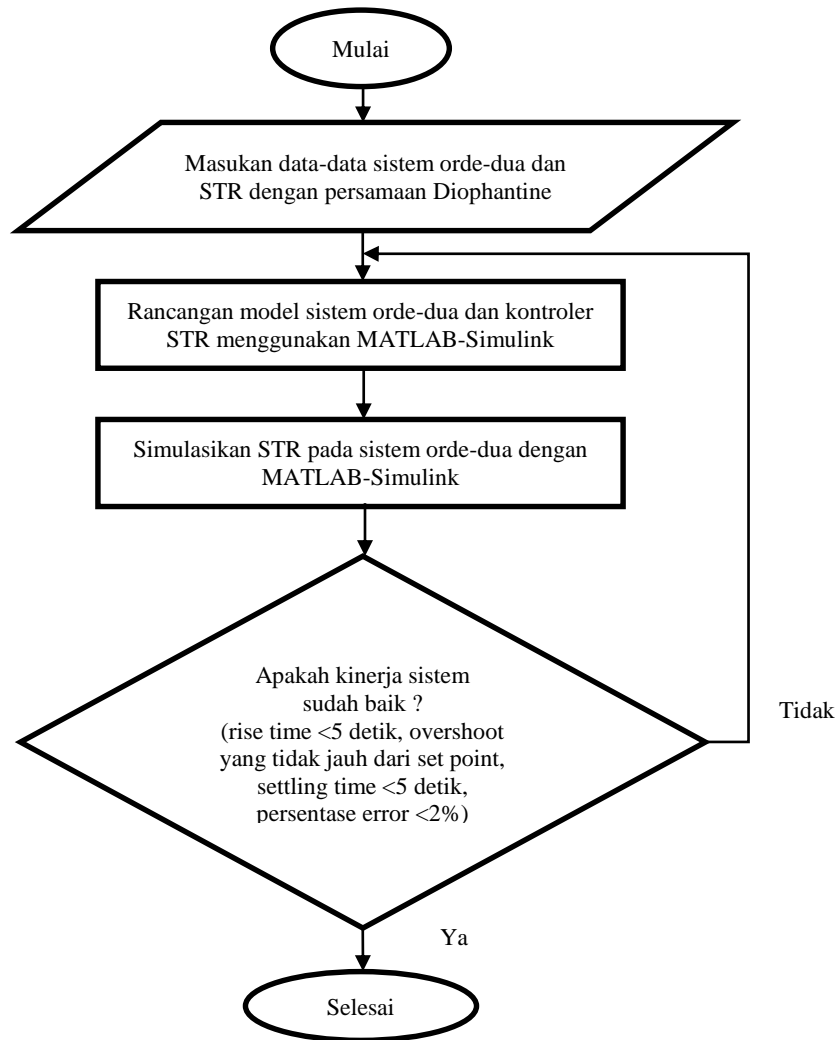
Damping ratio	Percentage overshoot
0.2	52.7
0.3	37.2
0.4	25.4
0.5	16.3
0.6	9.5
0.7	4.6
0.8	1.5
0.9	0.2

Tabel 1. Persentase dari overshoot

### C. Settling time

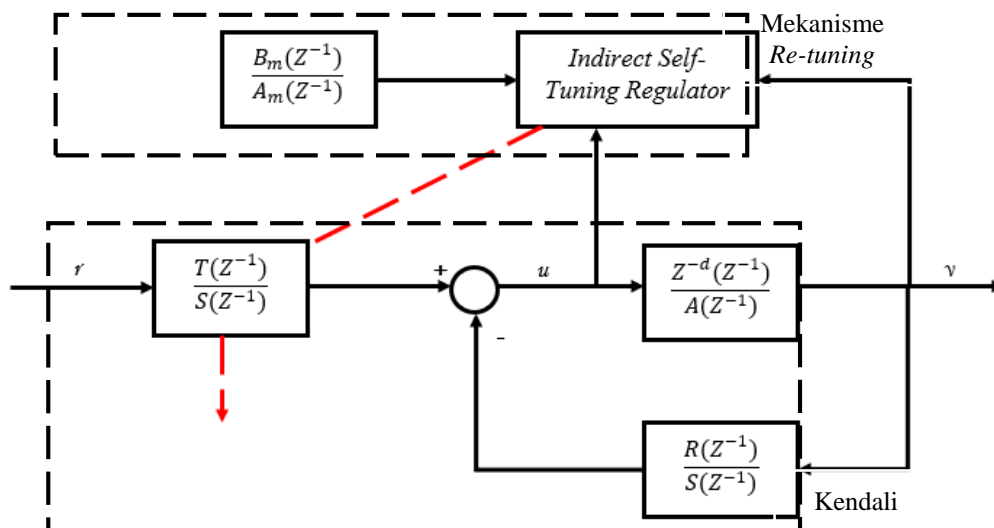
*Settling time* digunakan sebagai ukuran waktu yang dibutuhkan aksi kendali hingga menyesuaikan terhadap nilai *steady state*. Ini merupakan waktu yang dibutuhkan respon kendali untuk jatuh dalam batasan dan tetap dalam beberapa persentase tertentu dari nilai *steady state*. Jadi waktu penyelesaian dari aksi kendali hingga menyesuaikan dengan masukannya yaitu sebesar 2%, dan amplitudo kesalahan aksi kendali terhadap masukannya harus kurang dari 2%.

Adapun alur diagram penelitian ditunjukkan pada Gambar 4. Pelaksanaan penelitian meliputi tiga-tahap, yaitu memasukkan data-data sistem orde 2 dan STR, selanjutnya yaitu merancang model sistem orde 2 (*interacting tank*) dan kendali STR dengan menggunakan MATLAB, setelah dirancang melakukan simulasi kendali STR pada sistem orde dua dengan menggunakan MATLAB, setelah di simulasikan akan dilihat apakah performa aksi kendali terhadap masukan yang mengalami permasalahan sudah dapat terestimasi. Proses pendesain sistem terlihat pada Gambar berikut.



Gambar 4. Diagram alir penelitian

Simulasi yang hendak dirancang, dibentuk berbasiskan perangkat lunak Matlab dalam bentuk *M-File*/program terstruktur. Terlihat seperti gambar 5.



Gambar 5. mekanisme re-tuning parameter kontroler (pada garis merah putus-putus)

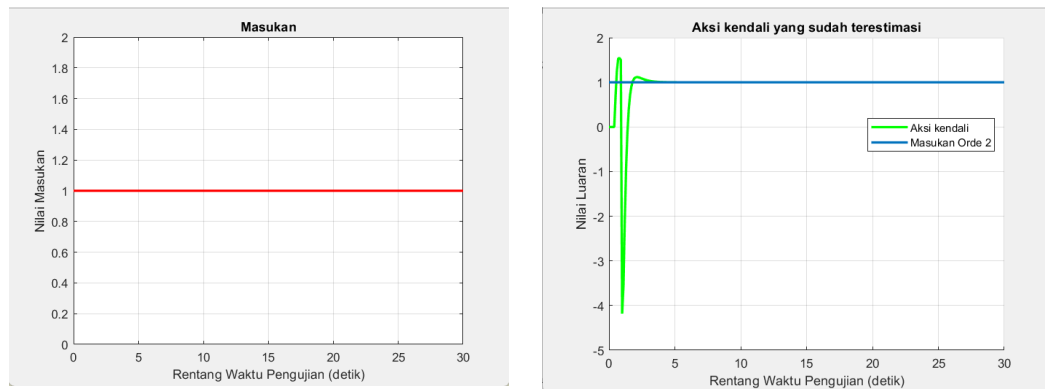
Mekanisme kendali yang terlihat pada gambar 3.3 merupakan bentuk dari kendali kalang tertutup yang diubah dalam bentuk digital, bentuk dari kendali tersebut digambarkan dengan beberapa polinomial yaitu polinomial  $(T, S)$  untuk kendali,  $(R, S)$  untuk polinomial *feedback*, dan polinomial  $(A, B)$  untuk sistem.

Kendali ini awalnya bekerja dengan normal tetapi bila masukan ( $r$ ) mengalami permasalahan maka luaran ( $y$ ) menjadi tidak stabil, agar luaran menjadi stabil diperlukanlah sebuah mekanisme penalaan ulang salah satunya yaitu menggunakan Indirect Self-Tuning Regulator (ISTR). Mekanisme penalaan ulang yaitu dengan mengestimasi parameter dari masukannya dengan program yang terlihat pada gambar 2.8 selain mengestimasi parameter, dalam melakukan *re-tuning* juga menentukan kembali polinomialnya. Dalam menentukan polinomial digunakanlah persamaan diophantine dikarenakan ada dua atau lebih variabel yang akan ditentukan, dalam penentuan polinomial akan menggunakan program pada gambar 2.10. polinomial yang ditentukan dengan persamaan diophantine yaitu polinomial kendalinya  $(T, S)$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian berwujud luaran berupa grafik kendali versus waktu, aksi kendali, parameter estimasi, dan luaran kendali setelah terestimasi. Aksi kendali adalah isyarat paksa yang dimasukkan kepada input. Sedangkan luaran kendali adalah performa kerja dari sistem.

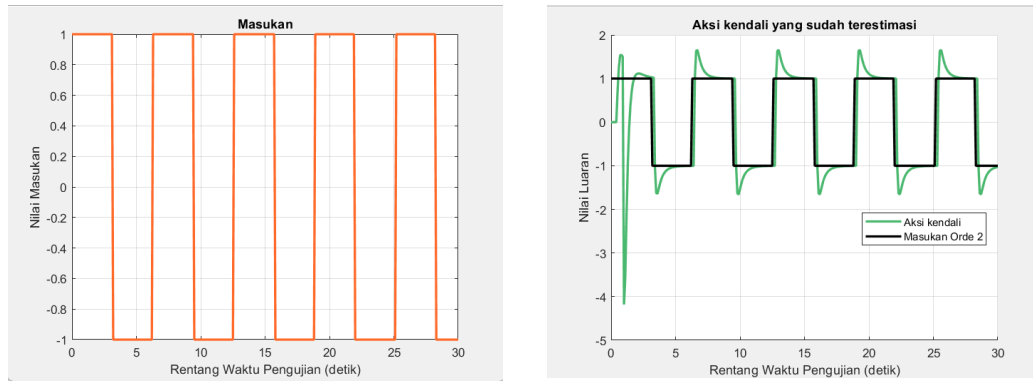
Performa luaran dari sistem kendali akan diuji dengan berbagai variasi dari referens (isyarat tangga, isyarat segi empat, isyarat acak). Program yang dijalankan menghasilkan bentuk luaran grafik dari setiap masukannya. Simulasi STR pada tangki dilakukan dengan berbagai macam variasi, yaitu tangga, persegi, dan acak. Gambar dari luaran simulasi STR terlihat pada gambar



Gambar 6. Masukan dan luaran tangga

Pada gambar merupakan masukan dan aksi kendali terhadap masukan tangga yang telah bekerja sesuai dengan yang diestimasi. Terlihat *overshoot* pada kendali tidak terlalu jauh dari masukannya pada 5 detik pertama, pada 5 detik pertama terjadi *overshoot* sebesar 1,5 p.u. tetapi setelah itu kendali mengalami penurunan hingga -4 p.u. yang selanjutnya setelah 5 detik pertama kendali sudah menyesuaikan kinerja dengan masukannya.

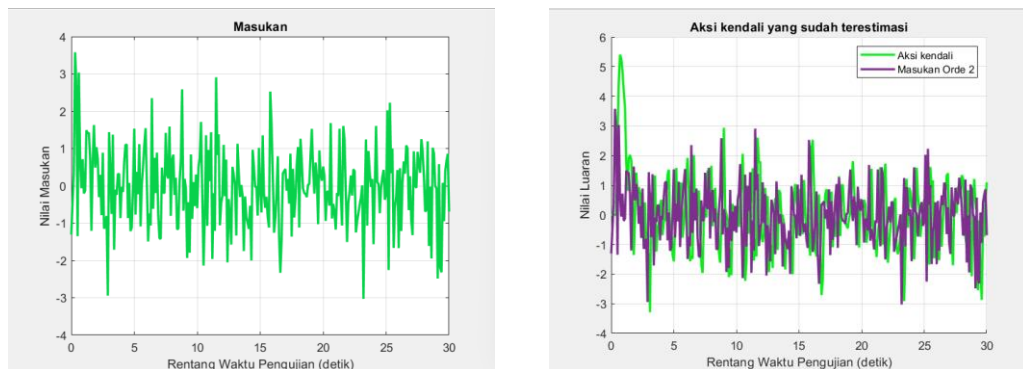
Aksi kendali sempat mengalami *overshoot* lalu kembali turun hingga sangat rendah hal ini dikarenakan untuk mendapatkan nilai estimasi yang baik terhadap masukannya, kendali memberikan aksi *error* yang besar pada awal simulasi untuk menentukan batas yang akan diestimasi terhadap masukannya agar kendali setelah mengalami *error* yang besar jauh lebih konstan dalam pengendaliannya.



Gambar 7. Masukan dan luaran persegi

Kinerja kendali seperti pada gambar yang merupakan luaran dari aksi kendali terhadap masukannya setelah diestimasi. Pada gambar tersebut *overshoot* masih berada pada nilai yang diestimasi yaitu sebesar 0,7 p.u. dengan nilai 1,7 p.u. dari masukannya, tetapi titik terendah pada kendali berada pada nilai -4 pada 5 detik pertama tetapi setelah melewati 5 detik pertama kendali bekerja untuk menyesuaikan dengan masukannya. Pada luaran kendali ini masih terjadi *low pass* yang dikarenakan masukannya dalam bentuk segi empat dan sistem bekerja pada orde dua hal ini mengakibatkan kendali harus bekerja secara cepat terhadap waktunya.

Pada awal simulasi aksi kendali masih sama seperti hasil kendali pada masukan tangga. Tetapi ketika aksi kendali sudah menyesuaikan, aksi kendali masih sedikit menjauhi dari aksi kendalinya tetapi secara cepat menyesuaikan kembali dengan masukan. Hal ini dikarenakan untuk menstabilkan aksi kendali, masukan berupa fluida sempit menjauhi dari *setpoint*-nya, tetapi kondisi ini tidak berlangsung lama dan secara cepat langsung menyesuaikan pada *setpoint*-nya.



Gambar 8. Masukan dan luaran acak

Hasil pengendalian terhadap masukan setelah diestimasi terlihat pada gambar 4.6, error yang terjadi pada aksi kendali bisa diperkecil, pada 5 detik pertama aksi kendali masih mengalami error yang melebihi dari masukannya, *error* maksimum sebesar 5,5 p.u. dan *error* minimum sebesar -3,2 p.u tetapi setelah melewati 5 detik pertama kendali dapat menyesuaikan kinerjanya sesuai masukannya walaupun masih terjadinya *error* yang kecil dalam estimasi kendalinya.

Bentuk tersebut terjadi untuk memperlihatkan seberapa besar aksi kendali dapat terestimasi terhadap masukan acak, terlihat pada gambar 6 pada awalnya kendali masih belum terestimasi untuk memperlihatkan *error* terbesar pada aksi kendalinya. Tetapi setelah melalui 5 detik pertama nilai dari setiap aksi kendali terhadap masukannya sudah dapat terestimasi sehingga pengendalian dapat bekerja dengan stabil.

#### 4. KESIMPULAN



Sistem kendali STR (menggunakan persamaan diophantine orde 4 dan objeknya berupa tangki berorde 2 yang bersifat interacting) telah berhasil mengendalikan permukaan pada sistem interacting tank. Dengan memiliki settling time 3,6 detik untuk masukan tangga dan 3,1 detik untuk masukan persegi.

Untuk mendapatkan respon sistem terkait kecukupan proses kendali sebaiknya digunakan masukan dengan referens berjenis tangga (untuk nilai positif) dan masukan persegi untuk nilai positif dan negatif, sedangkan bila diinginkan magnituda error kendali sebaiknya digunakan referens bilangan acak.

Estimator terbukti dapat membatasi kinerja kendali pada batas minimum dan batas maksimum estimasinya, selain itu estimator juga memberikan estimasi secara real-time dengan masukan yang selalu diperbaharui dan berbeda-beda.

## 5. SARAN

Saran untuk peneliti selanjutnya agar penelitiannya jauh lebih kompleks yaitu dengan melakukan pengujian menggunakan lebih banyak lagi referensnya, agar lebih banyak opsi terkait perbedaan referens terhadap luaran pada kendali setelah terestimasi dan juga algoritma untuk estimasi dapat digantikan dengan algoritma yang lain seperti LMS (Least Mean Square) pada proses kendali tinggi level fluida interacting tank.

## Daftar Pustaka

- Astorn, K. J. dan Wittenmark, B. 1995. Adaptive Control, 2nd Ed., Dover Pub. Inc., Mineola, New York.
- Åström, K. J. (1975). Self-Tuning Regulators. In Systems Reliability Issues for Future Aircraft: a workshop sponsored by Ames Research Center held at Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts August 18-20, 1975 (pp. 51-67). (NASA CP-003 ). National Aeronautics and Space Administration.
- Ayten, K. K., Dumlu, A., Kaleli, A., & Kaplan, N. H. (2017, August). Real time parameter estimation and experimental validation of adaptive self-tuning regulator for the liquid level control process. In 2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET) (pp. 1-6). IEEE.
- Fitriyanto, M., Wahyudi, W., & Setiawan, I. (2011). Aplikasi Kendali Adaptif pada Pengendalian Plant Pengatur Suhu dengan Self Tuning Regulator (STR) (Doctoral dissertation, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Undip).
- Hajizadeh, A., Shahirinia, A. H., Namjoo, N., & Yu, D. C. (2015). Self-tuning indirect adaptive control of non-inverting buck-boost converter. IET Power Electronics, 8(11), 2299-2306.
- Johnson, C., 1977, Process Control Instrumentation Technology, 4th edition, Prantice Hall Career & Technology, New Jersey.
- Kamoun, S. 2010. Design of Optimal Self-Tuning Regulators for Large Scale Stochastic Systems. International Journal of Information and systems Sciences, Vol. 6, No. 2, pp. 201-219.
- Lukman, A. (2004). Implementasi Filter Wiener dengan Algoritma Recursive Least Square (RLS) pada Noise Canceling Berbasis FPGA.
- Luyben, W. L. 1996. Process Modelling , Simulation, and Control for Chemical Engineering, 2nd Edition. McGraw-Hill Publishing Company, New York.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., and Harriet, P., 1993, Unit Operations of Chemical Engineering, Mc Graw Hill, Inc., New York.
- Meng, X., Yu, H., Xu, T., & Wu, H. (2020). Disturbance observer and I2-gain-based state error feedback linearization control for the quadruple-tank liquid-level system. Energies, 13(20), 5500.
- Mungale, N. R., Upadhyay, A., & Pandian, B. J. (2017, November). Self-tuning regulator for an interacting CSTR process. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 263, No. 5, p. 052012). IOP Publishing.

- Mursyitah, D. (2018). Perancangan Pengendali Hybrid PID Gain Scheduling dan Sliding Mode Control Untuk Pengendalian Level. *SITEKIN: Jurnal Sains, Teknologi dan Industri*, 15(2), 87-93.
- Nagrath, I.J., and Gopal, N., 1982, *System, Modelling and Analysis*, Tata McGraw Hill Comp. Limited, New Delhi.
- Nawawi, I. dan Herjunanto, S. 2008. Implementasi persamaan Diophantine pada sistem kendali adaptatif skema self-tuning regulator. Tesis S2 Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada. [http://etd.repository.ugm.ac.id/home/detail\\_pencarian/37288](http://etd.repository.ugm.ac.id/home/detail_pencarian/37288)
- Prabhu, K. dan Bhaskaran, V. M. 2013. Optimization of a Temperature Control Loop using Self Tuning Regulator. *International Journal of Computer Applications*, Vol. 61, No. 9, Januari.
- Pujiriyanto, A., 2004. *Cepat Mahir Matlab*. s.l.:Kuliah berseri IlmuKomputer.com.
- Shanah, M. (2020). *Penyelesaian persamaan Diophantine non Linier Kuadrat* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).
- Short, M., & Selvakumar, A. A. (2020). Non-Linear Tank Level Control for Industrial Applications. *Applied Mathematics*, 11(09), 876.
- Siagian, P., 2011. SIMULASI MATLAB UNTUK PERANCANGAN PID CONTROLER. *Jurnal PROCESSOR*, Volume 6, pp. 51-60.
- Suganya, S., Deepa, P. dan Rajinikanth, C. 2017. Design of PID Controller for Chemical Process-heuristic Algorithm Approach. 2017 Third International Conference on Science Technology Engineering & Management (ICONSTEM), 23-24 Maret, Chennai, India.
- Suryakala, S. dan Rathikarani, D. 2014. Self Tuning Regulators for a Liquid Level Process. *Advances in Natural and Applied Sciences*, Vol. 8, No. 22, pp. 19-27.
- Susanto, E., 2008. Kendali Adaptif Model Reference Adaptive Controller (MRAC) Pada Servo DC Menggunakan Estimator Recursive Least Square (RLS) dan Optimasi Genetik. *EECIS*, pp. 34-39.
- Wu, Z. 2001. Simulation study and instability of adaptive control. Louisiana State University Thesis, Graduate School, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. [Http://lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4602&context=gradschool\\_theses](Http://lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4602&context=gradschool_theses) [https://digitalcommons.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4602&context=gradschool\\_theses](https://digitalcommons.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4602&context=gradschool_theses)
- Bolton, W., 2002. *Control Systems*. 1st ed. Oxford: Elsevier Ltd.. 88-91.