

jTEP

JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

P-ISSN No. 2407-0475 E-ISSN No. 2338-8439

Vol. 6, No. 1, April 2018



Publikasi Resmi
Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
(Indonesian Society of Agricultural Engineering)
bekerjasama dengan
Departemen Teknik Mesin dan Biosistem - FATETA
Institut Pertanian Bogor



Jurnal Keteknikan Pertanian (JTEP) terakreditasi berdasarkan SK Dirjen Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Ristek Dikti Nomor I/E/KPT/2015 tanggal 21 September 2015. Selain itu, JTEP juga telah terdaftar pada Crossref dan telah memiliki Digital Object Identifier (DOI) dan telah terindeks pada ISJD, IPI, Google Scholar dan DOAJ. JTEP terbit tiga kali setahun yaitu bulan April, Agustus dan Desember, dan mulai tahun ini berisi 15 naskah untuk setiap nomornya. Peningkatan jumlah naskah pada setiap nomornya ini dimaksudkan untuk mengurangi masa tunggu dengan tidak menurunkan kualitas naskah yang dipublikasikan. Jurnal berkala ilmiah ini berkiprah dalam pengembangan ilmu keteknikan untuk pertanian tropika dan lingkungan hayati. Jurnal ini diterbitkan dua kali setahun baik dalam edisi cetak maupun edisi online. Penulis makalah tidak dibatasi pada anggota PERTETA tetapi terbuka bagi masyarakat umum. Lingkup makalah, antara lain meliputi teknik sumberdaya lahan dan air, alat dan mesin budidaya pertanian, lingkungan dan bangunan pertanian, energi alternatif dan elektrifikasi, ergonomika dan elektronika pertanian, teknik pengolahan pangan dan hasil pertanian, manajemen dan sistem informasi pertanian. Makalah dikelompokkan dalam invited paper yang menyajikan isu aktual nasional dan internasional, review perkembangan penelitian, atau penerapan ilmu dan teknologi, technical paper hasil penelitian, penerapan, atau diseminasi, serta research methodology berkaitan pengembangan modul, metode, prosedur, program aplikasi, dan lain sebagainya. Penulisan naskah harus mengikuti panduan penulisan seperti tercantum pada website dan naskah dikirim secara elektronik (online submission) melalui <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>.

Penanggungjawab:

Ketua Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
Ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB

Dewan Redaksi:

Ketua : Wawan Hermawan (Scopus ID: 6602716827, Institut Pertanian Bogor)
Anggota : Asep Sapei (Institut Pertanian Bogor)
Kudang Boro Seminar (Scopus ID: 54897890200, Institut Pertanian Bogor)
Daniel Saputra (Scopus ID: 6507392012, Universitas Sriwijaya - Palembang)
Bambang Purwantana (Universitas Gadjah Mada - Yogyakarta)
Yohanes Aris Purwanto (Scopus ID: 6506369700, Institut Pertanian Bogor)
Muhammad Faiz Syuaib (Scopus ID: 55368844900, Institut Pertanian Bogor)
Salengke (Scopus ID: 6507093353, Universitas Hasanuddin - Makassar)
I Made Anom Sutrisna Wijaya (Scopus ID: 56530783200, Universitas Udayana - Bali)

Redaksi Pelaksana:

Ketua : Rokhani Hasbullah (Scopus ID: 55782905900, Institut Pertanian Bogor)
Sekretaris : Lenny Saulia (Scopus ID: 16744818700, Institut Pertanian Bogor)
Bendahara : Hanim Zuhrotul Amanah (Universitas Gadjah Mada - Yogyakarta)
Anggota : Dyah Wulandani (Scopus ID: 1883926600, Institut Pertanian Bogor)
Usman Ahmad (Scopus ID: 55947981500, Institut Pertanian Bogor)
Satyanto Krido Saptomo (Scopus ID: 6507219391, Institut Pertanian Bogor)
Slamet Widodo (Scopus ID: 22636442900, Institut Pertanian Bogor)
Liyantono (Scopus ID: 54906200300, Institut Pertanian Bogor)
Administrasi : Diana Nursolehat (Institut Pertanian Bogor)

Penerbit: Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA) bekerjasama dengan Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

Alamat: Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus Institut Pertanian Bogor, Bogor 16680.
Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026,
E-mail: jtep@ipb.ac.id atau jurnaltep@yahoo.com
Website: web.ipb.ac.id/~jtep atau <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>

Rekening: BRI, KCP-IPB, No.0595-01-003461-50-9 a/n: Jurnal Keteknikan Pertanian

Percetakan: PT. Binakerta Makmur Saputra, Jakarta

Ucapan Terima Kasih

Redaksi Jurnal Keteknikan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bebestari yang telah menelaah (*me-review*) Naskah pada penerbitan Vol. 6 No. 1 April 2018. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Prof.Dr.Ir. Edward Saleh, MS (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Prof.Dr.Ir. Nurpilihan Bafdal, M.Sc (Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran), Prof.Dr.Ir. Lilik Sutiarto, M.eng (Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Gadjah Mada), Dr.Ir. Andri Prima Nugroho, STP., M.Sc (Universitas Gadjah Mada), Prof.Dr.Ir. Bambang Purwantana (Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Gadjah Mada), Dr.Ir. Radite Praeko Agus Setiawan, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor), Prof.Ir. I Made Anom Sutrisna Wijaya, M.App.Sc., Ph.D (Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana), Dr.Ir. Amin Rejo, M.P (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Prof.Dr.Ir. Daniel Saputra, MS (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Prof.Dr.Ir. Hasbi, MSi (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Dr. Siti Nikmatin, M.Si (Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor), Dr. Farkhan (PT. CNC Controller Indonesia), Dr. Alimuddin, ST., MM., MT (Universitas Sultan Ageng Tirtayasa) Dr. Dedy Wirawan Soedibyo, STP., M.Si (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Jember), Dr. Radi, STP., M.Eng (Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Gadjah Mada), Dr.Ir. Lenny Saulia, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Nursigit Bintoro, M.Sc (Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Gadjah Mada), Dr.Ir. Rokhani Hasbullah, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr. Andasuryani, STP., M.Si (Program Studi Teknik Pertanian, Universitas Andalas), Dr.Ir. I Wayan Budiastira, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. I Dewa Made Subrata (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr. Ir. Nora H. Pandjaitan, DEA (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Rusnam, MS (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas), Dr. Radi, STP., M.Eng (Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Gadjah Mada), Dr. Suhardi, STP., MP (Program Studi Keteknikan Pertanian, Universitas Hasanuddin) Dr. Ir. Yuli Suharnoto, M.Eng (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor).

Technical Paper

**Penalaan PID Menggunakan *Internal Model Controller*
dengan Pendekatan Model *Tustin***

PID Tuning Using Internal Model Controller with Tustin Model Approach

Abdul Azis, Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian, Sekolah Pasca Sarjana, Institut Pertanian Bogor.
Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanudin. Email: abadzakwaan@gmail.com
Radite Praeko Agus Setiawan, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

Email: iwan_radit@yahoo.com

Wawan Hermawan, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

Email: w_hermawan@ipb.ac.id

Tineke Mandang, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor. Email: tineke_mandang_2003@yahoo.com

Abstrack

PID control is a popular controlling technique in high accuracy control system. PID tuning is a very important stage and affects the reliability of the PID control system. This stage plays a role in determining K_P , K_I , and K_D constants. Currently it has been a lot of PID tuning techniques that have been developed from the Ziegler-Nichols methods. PID Tuning using Internal Model Controller (IMC) by Tustin discrete approached models was used in this study. Open-loop method was used with two variation value of PWM (20% and 80%). The purposes of this study were to determine the PID constants and test those performances using a DC motor. The result of PID tuning process generated two pairs of K_P , K_I , and K_D constants. The first were 0.4013; 0.0988; 0.0176, and the second were 0.2314; 0.0531; 0.044, respectively. The testing results with DC motor showed the performance of the both pairs of PID constants obtained were reliable enough to control motor speed that was characterized by the ability to follow the set-point value that was given and there was no steady state error. There was oscillation at 1500 rpm and 2000 rpm and motor power couldn't achieve the set-point at 2000 rpm.

Keywords: *IMC, PID constant, PID tuning, Tustin model.*

Abstrak

Kontrol PID merupakan salah satu teknik pengontrolan yang populer untuk pengontrolan sistem dengan ketelitian tinggi. Terdapat satu tahapan yang sangat penting dan mempengaruhi kehandalan dari sistem kontrol PID yang dihasilkan. Tahapan tersebut adalah penalaan (*tuning*) PID. Tahapan ini menjadi penting karena berperan dalam penentuan konstanta PID (K_P , K_I , dan K_D). Saat ini telah banyak teknik penalaan PID yang telah dikembangkan dari teknik *Ziegler-Nichols*. Penalaan PID dengan teknik *Internal Model Controller* (IMC) melalui pendekatan model *discrete Tustin* digunakan dalam penelitian ini. Metode *open-loop* dengan teknik pengontrolan PWM dipakai dengan dua variasi nilai PWM yaitu 20% dan 80%. Tujuan penelitian ini adalah menemukan konstanta PID dan menguji performanya dengan motor DC. Dari proses penalaan PID yang dilakukan, diperoleh dua pasang konstanta K_P , K_I , dan K_D . Konstanta pertama masing-masing sebesar 0.4013; 0.0988; dan 0.0176, dan pasangan kedua masing-masing sebesar 0.2314; 0.0531; dan 0.044. Hasil pengujian dengan motor DC memperlihatkan performa konstanta PID yang diperoleh cukup handal dalam mengontrol kecepatan motor yang ditandai oleh kemampuan motor dalam mengikuti nilai *set-point* yang diberikan dan tidak terjadi *steady state error*. Akan tetapi terjadi osilasi pada *set-point* 1500 rpm dan 2000 rpm dan kekuatan motor tidak dapat mencapai *set-point* 2000 rpm.

Kata kunci: *IMC, konstanta PID, penalaan PID, model Tustin*

Diterima: 23 Maret 2017; Disetujui: 14 Juli 2017

Pendahuluan

Artikel ini merupakan bagian dari penelitian pertanian presisi dalam aplikasi pemupukan presisi untuk tanaman padi dengan penggerak traktor ringan. Secara umum, penelitian ini terbagi dalam tiga bagian utama, yaitu aplikasi *Variable Rate Applicator* (VRA), *Real Time Kinematics Differential Global Positioning System* (RTK DGPS), dan aplikasi dengan traktor ringan. Teknologi VRA merupakan teknologi yang difungsikan untuk mengatur dosis pemupukan, Teknologi ini terdiri dari sistem kontrol dan sistem *metering device*. Sistem *metering device* sendiri terdiri dari *Hopper*, *metering device* tipe auger, dan motor DC. Dosis pupuk yang dikeluarkan sistem *metering* ditentukan oleh putaran *auger* yang digerakkan oleh motor DC. Agar dosis pupuk dapat dikendalikan, maka dilakukan pengendalian pada putaran motor DC melalui sebuah sistem kontrol. Elemen kontrol yang digunakan dalam penelitian ini adalah kontrol PID. Oleh karena itu, perlu dilakukan proses penalaan (*tuning*) PID untuk menentukan konstanta-konstanta PID yang meliputi konstanta K_P , K_I dan K_D .

Ketika membahas tentang kontrol PID, tentunya tidak terlepas dari istilah kontrol secara umum. Pengertian dari sistem kontrol merupakan sebuah sistem dimana masukan-masukan dari sistem tersebut dapat digunakan untuk mengendalikan keluaran pada suatu nilai tertentu yang dikehendaki, dapat memberikan urutan kejadian tertentu dan dapat menghasilkan kejadian tertentu jika syarat atau beberapa kondisi terpenuhi (Bolton 2004). Aplikasi sistem kontrol untuk saat ini sudah sangat luas dan banyak digunakan dalam banyak industri proses dan manufaktur, dari industri kecil hingga industri besar yang memerlukan pekerjaan dengan tingkat presisi tinggi yang sulit ditangani oleh tenaga manusia.

Setiap orang yang berkecimpung di bidang instrumentasi dan kontrol, baik dari kalangan peneliti/perekayasa, akademisi dan praktisi tentunya tidak asing dengan istilah kontrol PID. Kontrol PID merupakan salah satu sistem pengendalian yang cukup tua dan telah dikenal sejak lama dari tahun 1910 melalui Elmer Sperry dan dikembangkan oleh Ziegler-Nichols pada tahun 1942 melalui teori metode penalaan (*tuning*) PID yang hingga saat ini terkenal dengan metode *Ziegler-Nichols* (Ang et al., 2005). Kontrol PID merupakan salah satu teknik pengendalian yang populer dan banyak diminati dalam pengendalian banyak sistem dalam dunia industri, dan telah mengalami perkembangan secara signifikan dari tahun ke tahun baik dalam hal teori maupun teknologi (Eriksson dan Johansson, 2007), (Franklin et al., 1994), dan (Kazemian, 2001). Kontrol PID juga banyak digunakan dalam industri proses kimia (Shahrokhi dan Zomorodi, 2013) dan aplikasi *aerospace* (Jun dan Safonov, 1999).

Kontrol PID merupakan sebuah sistem pengendalian yang menggabungkan tiga mode

kontrol sekaligus yaitu kontrol proporsional, integral dan derivatif yang memungkinkan untuk mendapatkan sebuah pengendalian yang tidak mempunyai *error* keadaan tunak serta dapat mereduksi kecenderungan terjadinya osilasi (Bolton, 2004). PID controller sangat sering digunakan dalam proses kontrol untuk mengatur perilaku domain waktu dari berbagai jenis pekerjaan yang dinamis (Chiha et al., 2012).

Kepopuleran penggunaan kontrol PID sampai saat ini tentunya karena didukung oleh beberapa kelebihan, di antaranya merupakan salah satu teknik pengendalian yang memberikan kemudahan dan solusi yang efektif dalam menyelesaikan masalah pengendalian (Ang et al., 2005) dan (Kadu dan Patil, 2016), kesederhanaan fungsi dan kemudahan dalam pengaplikasian (Ahn dan Truong, 2009), (Li et al., 2006), memiliki kinerja yang handal (Jun dan Safonov, 1999), (Kaya, 2004) dan (Donghai et al., 2014), struktur yang sederhana dan kinerja baik dengan skala operasi yang lebar (Kao et al., 2006), mudah diaplikasikan baik dalam *hardware* maupun *software* (Kim et al., 2002) dan (Kaya, 2004). Kontrol PID mampu meregulasi sinyal yang benar berdasarkan *error* yang terjadi antara sinyal keluaran dari umpan balik dengan sinyal keluaran yang diharapkan (Nhon et al., 2014).

Langkah yang perlu dilakukan dalam perancangan sebuah pengendalian PID adalah pemilihan mode kontrol yang akan dilakukan apakah kontrol proporsional, proporsional-derivatif, proporsional-integral atau proporsional-integral-derivatif dan pemilihan nilai K_P , K_I dan K_D yang bersesuaian. Langkah ini akan menentukan bagaimana sistem akan bereaksi terhadap sebuah gangguan atau perubahan nilai pengaturan, seberapa cepat sistem menanggapi perubahan yang terjadi, berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan tunak setelah terjadi gangguan atau perubahan nilai pengaturan, serta apakah terdapat *error* keadaan tunak atau tidak (Bolton, 2004).

Jenis-jenis respon yang akan muncul untuk pemilihan mode kontrol akan berbeda ketika terjadi perubahan nilai pengaturan atau adanya gangguan secara tiba-tiba. Kontrol proporsional akan memberikan respon yang cepat dengan osilasi yang menghilang dengan cukup cepat tetapi meninggalkan *error* keadaan tunak. Kontrol proporsional plus integral tidak memiliki *error* keadaan tunak tetapi menimbulkan adanya gejala osilasi sebelum mencapai keadaan tunak. Kontrol proporsional plus integral plus derivatif tidak menghasilkan *error* keadaan tunak dan mengurangi osilasi yang ditimbulkan. Jadi kontrol proporsional mempercepat respon, kontrol integral menghilangkan *error* keadaan tunak serta kontrol derivatif akan mengurangi terjadinya osilasi (Bolton, 2004).

Salah satu kendala atau tantangan yang sering dialami ketika menggunakan controller PID adalah proses penalaan (*tuning*) untuk menentukan

konstanta-konstanta PID. Salah satu metode yang menjadi standar dalam proses penalaan adalah metode *Ziegler-Nichols* (Chiha *et al.*, 2012), namun metode ini seringkali sulit untuk menemukan parameter-parameter PID yang optimal. Metode penalaan seperti ini sudah jarang digunakan dalam praktek disebabkan melelahkan dan memakan banyak waktu, khususnya untuk proses dengan *time constant* yang besar. Selain itu, memerlukan perhatian khusus dari insinyur teknik/instrument dan operator karena proses yang mendekati ketidakstabilan terutama dengan *gain* dan periode yang sangat tinggi (Hang *et al.*, 1991). Kontrol PID sederhana sering tidak mampu mengontrol secara efektif *plant* dengan *time delay* yang panjang (Kaya, 2004). Hal ini disebabkan karena Penalaan kontrol PID memerlukan model yang akurat dari sebuah proses dan aturan desain kontrol yang efektif (Bi *et al.*, 2000).

Terkait dengan segala kekurangan dan kelemahan dari metode *Ziegler-Nichols*, maka telah banyak dikembangkan metode-metode penalaan yang lebih optimal dan dapat menghasilkan konstanta-konstanta PID yang optimal. Di antara metode-metode tersebut antara lain optimalisasi dengan logika fuzzy, jaringan syaraf, logika syaraf-fuzzy, algoritma *immune*, simulasi *annealing*, dan pengenalan pola (*pattern recognition*). Selain itu, terdapat banyak metode penalaan PID yang optimal lainnya berdasarkan banyak metode pencarian acak seperti *genetic algorithm* (GA), *particle swarm optimization*, dan *ant colony optimization* (Chiha *et al.*, 2012).

Selain itu, telah banyak publikasi mengenai metode penalaan kontrol PID, antara lain penalaan *on-line* PID menggunakan *Continuous Action Reinforcement Learning Automata* (CARLA) (Howell dan Best, 2000), *Fuzzy PID controller* (Jantzen, 1998), penalaan *online fuzzy* PID controller berbasis *Robust Extended Kalman Filter* (REKF) (Ahn dan Truong, 2009), berbasis *Internal Model Controller* dengan konfigurasi prediksi Smith (Kaya, 2004), fuzzy PID dengan *Internal Model Controller* (Kao *et al.*, 2006), (Ho *et al.*, 1998), algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) (Kumar *et al.*, 2010), self-tuning kontrol PID dengan *Particle Swarm Optimization Approach* (PSOA) (Kao *et al.*, 2006), *Bode's Integrals* (Karimi *et al.*, 2003), *Extremum Seeking* (Killingsworth dan Krstic, 2006), *Immune Algorithm* (Kim *et al.*, 2002), pengembangan *Genetic Algorithm* (GA) (Kim *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2008; dan Zhang *et al.*, 2009), *fuzzy neural network* (Lee dan Teng, 2003), *Adaptive Interaction* (Lin *et al.*, 2000), *Integral of Time-weighted Absolute Error* (ITAE) *Criterion* (Martins, 2005), *Loop shaping H[∞] control* (Tan *et al.*, 1998), dan *Ant algorithm* (Varol dan Bingul, 2004).

Salah satu metode penalaan PID yang banyak dikembangkan dalam proses pengontrolan adalah metode *Internal Model Controller*. Kontrol PID dengan metode IMC telah digunakan dalam sistem *magnetic*

levitation (Duka *et al.*, 2016), pengontrolan pada *superheated steam temperature* (Li *et al.*, 2016b), pengontrolan sistem yang tidak stabil (Begum *et al.*, 2016). Penggunaan teknik tuning PID dengan metode IMC dapat meminimalisir *error* dengan membandingkan antara keluaran proses dengan keluaran hasil prediksi dengan menggunakan *inverse model* sehingga dapat digunakan untuk mengoptimalkan kontrol PID (Li *et al.*, 2016a). *Internal Model Controller* (IMC) secara eksplisit memberikan strategi yang menggunakan model dari proses yang dikendalikan untuk mengembangkan kontroler yang tepat (Duka *et al.*, 2016).

Keuntungan dari penggunaan *Internal Model Controller* (IMC) menurut (Shahrokhi dan Zomorodi, 2013) adalah secara eksplisit memperhitungkan kesalahan yang mungkin timbul akibat model ketidakpastian dan dimungkinkan bagi *programer* untuk mengganti sistem kontrol yang sedang berjalan dengan pertimbangan adanya perubahan-perubahan yang terjadi akibat gangguan eksternal dan akibat adanya kesalahan dalam pemodelan. Blok diagram IMC ditunjukkan pada Gambar 1a dan 1b. Gambar 1a merupakan struktur dasar dari IMC sedangkan Gambar 1b merupakan ekuivalent dari sistem kontrol berumpan-balik dari IMC. Pada diagram tersebut, G_p merupakan fungsi transfer dari proses, G_m merupakan fungsi transfer dari proses model dan G_{cl} merupakan fungsi transfer dari kontrol IMC yang secara konvensional dapat diformulasikan seperti

$$G_c = \frac{G_{cl}}{1 - G_{cl}G_m} \quad (1)$$

Untuk memperoleh sistem pengontrolan yang lebih baik maka diperlukan sebuah persamaan filter

$$G_f = \frac{1}{(\tau_f S + 1)^n} \quad (2)$$

(Morari dan Zafiriou 1989) telah merumuskan sebuah model menggunakan teknik IMC orde satu dengan fungsi *time delay*

$$G_p(S) = \frac{k}{\tau_f S + 1} e^{-ds} \quad (3)$$

Penalaan PID dengan metode IMC melalui pendekatan model *Tustin* digunakan dalam artikel ini. Model ini sangat cocok untuk menyelesaikan persamaan-persamaan *discrete* (*digitization proses*) (Franklin *et al.*, 1994). Pemilihan metode IMC ini dikarenakan kemudahan dalam melakukan penalaan dan kehandalan yang lebih baik dibandingkan penalaan PID metode *Ziegler-Nichols* (Radite, 2012). Dengan metode IMC dimungkinkan penalaan menggunakan metode *loop* terbuka. Adapun tujuan yang ingin dicapai adalah melakukan penalaan PID untuk memperoleh konstanta K_p , K_i , dan K_D dan menguji konstanta-konstanta tersebut untuk mengendalikan kecepatan motor DC.

Bahan dan Metode

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini dibedakan dalam dua bagian, yaitu perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras terdiri dari satu unit laptop *Asus* tipe *A43S*, mikrokontroler jenis *ARM-Cortex STM32F401 Nucleo*. Mikrokontroler ini merupakan jenis sistem minimum berbasis *STM32F401RE* yang memiliki 512 k *flash*, 96 k *RAM* dan beroperasi pada kanal 32 bit. Pada *board* ini sudah tertanam *ST-LINK/V2.1 programmer* dan *debug tool* yang memungkinkan dilakukan proses *download* dan *debug* program secara langsung tanpa perlu perangkat tambahan, modul *EMS 30A H-Bridge* sebagai driver motor DC. Motor DC yang digunakan adalah tipe *brushed* dengan input tegangan 12 V dan dilengkapi dengan metal gearbox dengan perbandingan gigi reduksi 100:1. Kecepatan putar maksimum pada *shaft output gear box* sebesar 100 rpm. Daya motor pada kondisi operasi normal (*free run*) sebesar 300 mA, sedangkan dalam kondisi terbebani (*stall*) mencapai 5A. Motor ini sudah dilengkapi dengan sebuah *encoder* tipe *integrated quadrature* dengan resolusi 64 *count per revolution* (CPR). Torsi maksimum motor sebesar 220 oz-in (16 kg-cm). Arah putaran *shaft* motor dapat diubah dengan mengubah polaritas input tegangan.

Perangkat lunak yang digunakan antara lain *keil MDK ARM versi 5.14* sebagai perangkat lunak untuk proses penulisan, kompilasi, dan mendownload program ke mikrokontroler, *tera term* sebagai perangkat lunak untuk komunikasi data antara mikrokontroler dengan laptop, dan *program solver* dari *Microsoft excell* untuk proses simulasi dan optimasi model.

Metode Penelitian

Metode pengujian dengan *step respon* kontrol *loop* terbuka digunakan untuk menentukan parameter-parameter kontrol seperti *proportional gain (K)*, *time constant (T)*, dan *time delay (d)*. Tahapan metode terbagi dalam 3 tahapan utama, yaitu proses pemrograman, pengembangan model dan simulasi metode *IMC Tustin*, dan pengujian dengan motor DC.

Proses Pemrograman

Pemrograman dilakukan menggunakan sebuah *software keil MDK ARM*. Proses pemrograman meliputi beberapa tahapan, diawali inialisasi *clock*, *timer*, *peripheral clock* dan *GPIO*. *Clock* yang digunakan adalah *PLL clock* karena memiliki akurasi paling baik. *Inialisasi timer* menggunakan *sysTick Timer* yang merupakan sebuah *24-bit down counter*. Inialisasi struktur *peripheral* dilakukan untuk mendeklarasikan variabel-variabel struktur yang digunakan, seperti *GPIO*, *Timer*, *USART*, dan *I2C*.

Pengaturan konfigurasi *peripheral* dilakukan untuk mengkanalisasi fungsi dan peran masing-masing *port I/O* yang akan digunakan. Konfigurasi pin *I/O* dapat difungsikan sebagai *I/O*, *USART*, *Timer*, *EXTI (External Interrupt)* dan *I2C* sesuai fungsi yang diinginkan.

Pengaturan putaran motor DC dapat dilakukan dengan mengatur polarisasi motor. Pengaturan ini dilakukan dengan mengirimkan sinyal ke pin *STM32F4* yang terhubung ke motor. Kecepatan putaran motor dikendalikan dengan menggunakan sistem pengendalian *PWM*. Kecepatan putar motor diatur pada nilai *PWM* 20% dan 80%. Data hasil pengujian ditampilkan melalui perangkat lunak *Tera Term* melalui jalur *USART*.

Pengembangan Model dan Simulasi Metode IMC Tustin

Fungsi alih dari motor DC mengikuti model orde satu dengan *time delay*

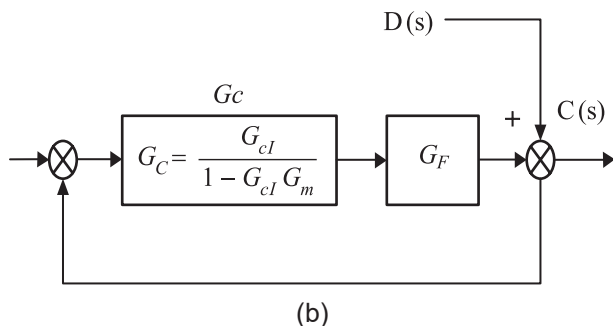
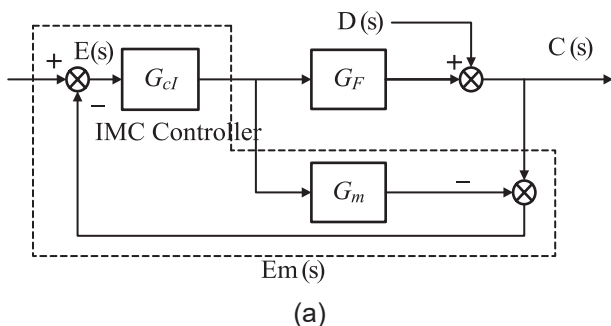
$$C(s) = \frac{k e^{-ds}}{1 + \tau S} \tag{4}$$

yang mengandung tiga parameter kontrol yaitu *Gain (K)*, *time delay (d)*, dan *time constant (τ)*. Ketiga parameter akan ditentukan dengan metode *step respon* dalam sebuah pengujian. Persamaan umum kontrol ini kemudian dikembangkan dengan persamaan pendekatan model *Tustin* dengan persamaan umum (Franklin et al., 1994).

$$S = \frac{2}{T} \frac{1 - Z^{-1}}{1 + Z^{-1}} \tag{5}$$

$$[1 + \tau S] C(s) = k e^{-ds} \tag{6}$$

Dengan mensubstitusi nilai *S* dengan model $\frac{2}{T} \frac{1 - Z^{-1}}{1 + Z^{-1}}$ maka diperoleh persamaan berikut



Gambar 1. Bagan struktur dasar *internal model controller* (a), *equivalent feedback internal model controller* (b)

$$\left[1 + \tau \left(\frac{2}{T} \frac{1 - Z^{-1}}{1 + Z^{-1}} \right) \right] C(S) = k e^{-ds} \quad (7)$$

$$\left[\frac{(1 + Z^{-1}) + \left(\frac{2\tau}{T} (1 - Z^{-1}) \right)}{1 + Z^{-1}} \right] C(S) = k e^{-ds} \quad (8)$$

$$\left[(1 + Z^{-1}) + \left(\frac{2\tau}{T} (1 - Z^{-1}) \right) \right] C(S) = (1 + Z^{-1}) k e^{-ds} \quad (9)$$

$$\left[\left(1 + \frac{2\tau}{T} \right) + \left(\left(1 - \frac{2\tau}{T} \right) Z^{-1} \right) \right] C(S) = (1 + Z^{-1}) k e^{-ds} \quad (10)$$

Ruas kanan merupakan fungsi *time delay*. Untuk memaksimalkan proses pengontrolan, maka *time delay* harus diminimalkan ≈ 1 , sehingga Persamaan 10 dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$\left(1 + \frac{2\tau}{T} \right) C_n + \left(1 - \frac{2\tau}{T} \right) C_{n-1} = k (\tau_{n-d/T} + \tau_{n-1-d/T}) \quad (11)$$

$$C_n = \frac{k (\tau_{n-d/T} + \tau_{n-1-d/T}) - \left(1 - \frac{2\tau}{T} \right) C_{n-1}}{\left(1 + \frac{2\tau}{T} \right)} \quad (12)$$

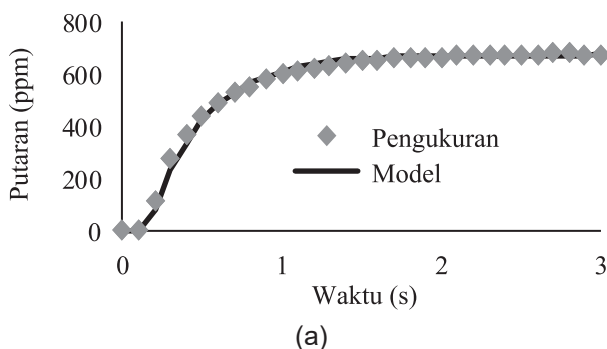
dimana C_n dan C_{n-1} adalah nilai kontrol selanjutnya dan sebelumnya, k adalah konstanta *gain*, τ adalah *time constant*, T adalah *time sampling*, dan $\tau_{n-d/T}$, $\tau_{n-1-d/T}$ adalah fungsi *time delay* proses berjalan dan sebelumnya.

Data berupa kecepatan motor dan waktu yang diperoleh dari pengujian pengontrolan *loop* terbuka kemudian dianalisis dengan menggunakan model yang diperoleh dari pengembangan metode IMC dengan model pendekatan *Tustin* (Persamaan 12) dan dioptimasi dengan menggunakan program *solver* dari *Microsoft excel*. Dengan cara itu, diperoleh parameter-parameter kontrol berupa *Gain* (K), *time constant* (T), dan *time delay* (d). Kemudian parameter-parameter tersebut digunakan untuk menentukan konstanta PID (K_P , K_I , dan K_D) dengan menggunakan persamaan

$$K_p = \frac{1}{K} \left[\frac{T + 0.5d}{T_c + 0.5d} \right] \quad (13)$$

$$T_i = T + 0.5d \quad (14)$$

$$K_p = \frac{T.d}{2T + d} \quad (15)$$



Pengujian dengan Motor DC

Nilai konstanta K_P , K_I , dan K_D digunakan untuk mengontrol kecepatan putar motor DC melalui persamaan kontrol PID. Dalam pengujian ini menggunakan kontrol *loop* tertutup dengan umpan-balik kecepatan motor melalui sebuah *encoder* yang terpasang pada motor DC dengan menggunakan persamaan kontrol PID (Radite, 2011):

$$C_n = C_{n-1} = K_p \left[(e_n - e_{n-1}) + K_I T K e_n - K_D \left(\frac{e_n - 2e_{n-1} - e_{n-2}}{T} \right) \right] \quad (16)$$

Dimana C_n dan C_{n-1} adalah nilai kontrol selanjutnya dan nilai kontrol sebelumnya. e_n , e_{n-1} , dan e_{n-2} adalah *error* proses, *error* proses sebelumnya dan *error* proses sebelum sebelumnya. K_P , K_I , dan K_D adalah konstanta PID untuk proporsional, integral dan differensial dan T adalah *time constant*

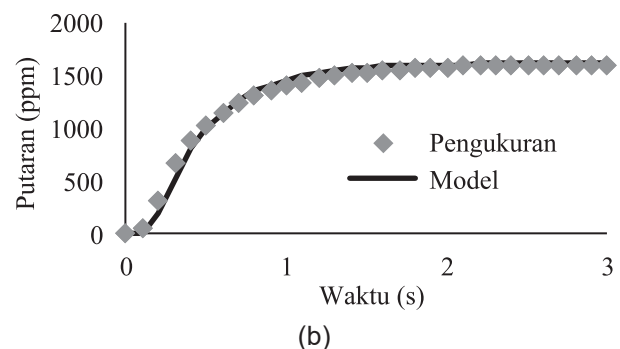
Hasil dan Pembahasan

Penalaan PID dan Simulasi Model

Hasil pengukuran dan simulasi konstanta-konstanta PID ditunjukkan pada Gambar 2. Grafik tipe titik merupakan hasil pengukuran, sedangkan tipe garis menunjukkan hasil simulasi model. Dari kedua grafik tersebut, terlihat bahwa hasil simulasi model yang diperoleh dapat mendekati hasil pengukuran yang sesungguhnya. Dari hasil simulasi diperoleh nilai parameter kontrol *proportional gain* (K), *time constant* (T), dan *time delay* (d) masing-masing sebesar 674.95; 0.36; dan 0.10 untuk perlakuan nilai PWM = 20%. Sedangkan untuk nilai PWM = 80% masing-masing sebesar 1612.86; 0.36 dan 0.15. Ketiga nilai parameter ini kemudian digunakan untuk menentukan nilai konstanta K_P , K_I dan K_D dengan persamaan 13, 14, dan 15. Dari hasil simulasi diperoleh nilai K_P , K_I dan K_D berturut-turut sebesar 0.4013; 0.0988 dan 0.0176 untuk perlakuan dengan PWM = 20%. Sedangkan perlakuan dengan PWM = 80% berturut-turut diperoleh sebesar 0.2314; 0.0531 dan 0.0440.

Pengontrolan Kecepatan Motor DC

Proses penalaan PID yang telah dilakukan menghasilkan konstanta-konstanta PID yang meliputi K_P , K_I dan K_D . Untuk melihat performa



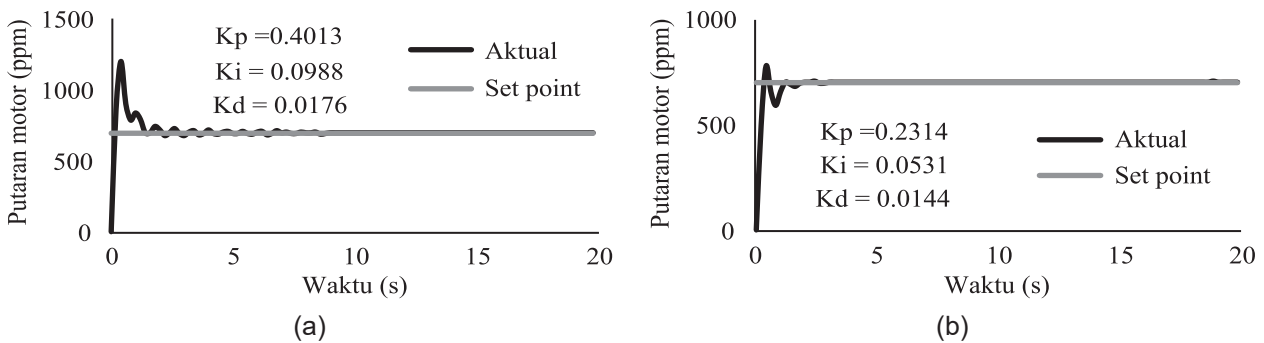
Gambar 2. Hasil penalaan dan simulasi parameter-parameter kontrol

dari konstanta-konstanta tersebut, maka dilakukan pembuktian melalui suatu pengujian. Dalam studi ini, pengujian dilakukan dengan menggunakan motor DC.

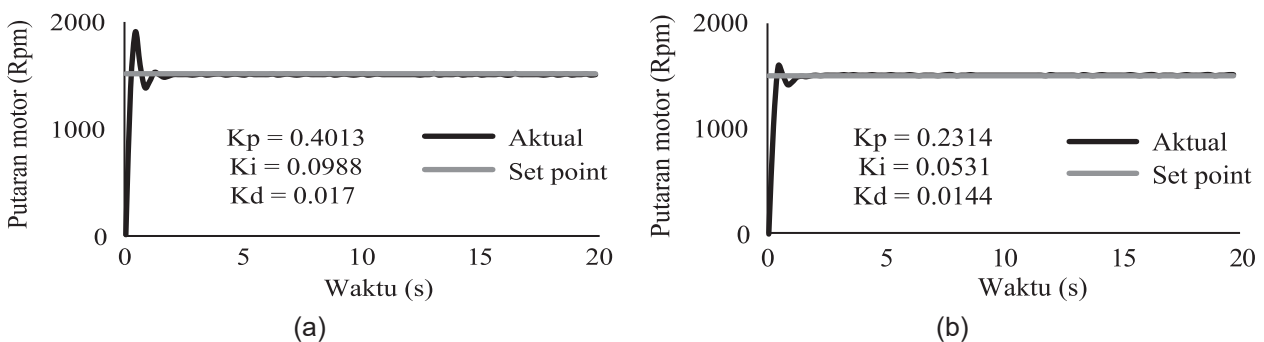
Hasil pengujian konstanta-konstanta PID yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 3, 4, dan 5. Gambar 3a dan 3b menunjukkan hasil pengujian kecepatan motor DC dengan *set-point* disetting pada kecepatan motor 700 rpm. Gambar 3a memperlihatkan grafik hasil pengujian dengan nilai K_p , K_i dan K_d berturut-turut sebesar 0.4013; 0.0988 dan 0.0176. Grafik tersebut menunjukkan nilai konstanta PID cukup handal dalam mengontrol kinerja motor DC yang ditandai dengan respon motor cukup cepat dengan *time delay* yang mendekati nol. Terjadi *overshoot* yang cukup tinggi yaitu sebesar 72.14% pada waktu $t = 0.4$ detik dan mengalami penurunan hingga 13.57% pada $t = 1.2$ detik. Dari hasil ini menunjukkan bahwa *overshoot* hanya berlangsung selama 1.2 detik. Setelah itu, terjadi osilasi disekitar *set-point* dan tertinggi sebesar 6.43% pada $t = 1.8$ detik, menurun menjadi 2.86%

hingga $t = 4$ detik dan menurun hingga 1% selama 4.6 detik. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi osilasi selama 7 detik. Setelah itu kecepatan motor menjadi konstan pada nilai *set-point*.

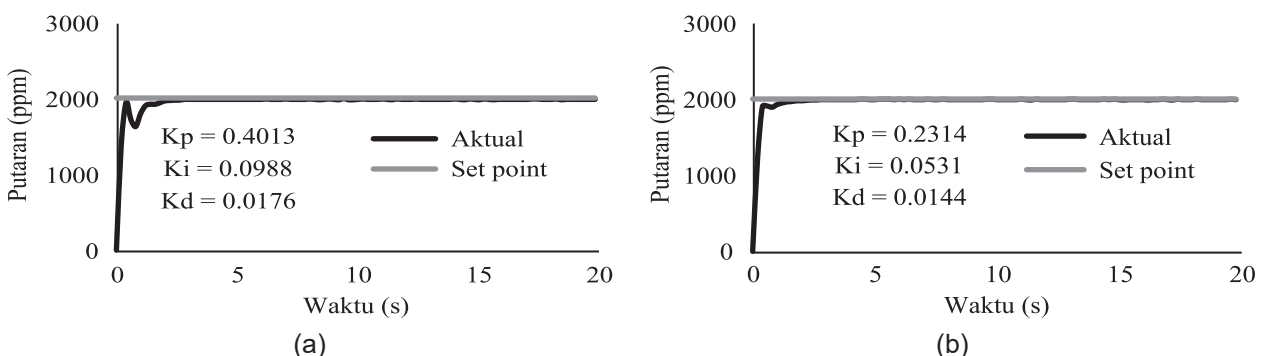
Hasil pengujian dengan konstanta K_p , K_i dan K_d berturut-turut sebesar 0.2314; 0.0531, dan 0.0144 (Gambar 3b) menunjukkan bahwa penggunaan konstanta PID yang lebih kecil dapat menurunkan *overshoot* yang timbul dan mengurangi osilasi. *Overshoot* yang terjadi hanya sebesar 11%, artinya terjadi penurunan sebesar 61%. Sedangkan osilasi hanya terjadi selama 1.4 detik, artinya terjadi pengurangan periode isolasi sebesar 5.6 detik. Dari kedua pengujian konstanta PID tersebut tidak menghasilkan *steady state error*. Hasil kedua pengujian ini menunjukkan bahwa perubahan nilai-nilai konstanta PID akan mempengaruhi hasil pengontrolan secara signifikan. Penggunaan nilai K_p yang besar akan menyebabkan terjadi *overshoot* yang tinggi dan meningkatkan osilasi. Oleh karena itu penggunaan nilai K_p , K_i dan K_d yang tepat akan mengurangi *overshoot* (K_p), mengeliminasi *error*



Gambar 3. Hasil pengujian parameter-parameter PID pada *set-point* 700 rpm.



Gambar 4. Hasil pengujian parameter-parameter PID pada *set-point* 1500 rpm.



Gambar 5. Hasil pengujian konstanta-konstanta PID pada *set-point* 2000 rpm.

offset dan osilasi (K_I) dan mereduksi ketertinggalan atau jeda waktu (K_D) (Bolton, 2004).

Gambar 4 menunjukkan hasil pengujian konstanta PID pada *set-point* 1500 rpm. Hasil pengujian dari kedua parameter tersebut memperlihatkan performa yang cukup baik dalam merespon perintah yang diberikan. *Overshoot* yang terjadi tertinggi sebesar 26.67 % (Gambar 4a) dan 5.65% (Gambar 4b). Namun, pada kedua pengujian ini terjadi osilasi selama pengujian sebesar 0.33%. Terjadinya osilasi kemungkinan disebabkan oleh penggunaan nilai konstanta PID hasil penalaan kurang tepat untuk kecepatan tinggi, terutama konstanta K_P karena penggunaan K_P yang terlalu besar akan memperbesar peluang terjadinya osilasi. Menurut Bolton (2004) bahwa osilasi terjadi disebabkan oleh jeda waktu yang terjadi pada sistem sehingga semakin besar K_P maka akan semakin besar aksi pengontrolan untuk suatu nilai *error* tertentu, sehingga peluang sistem untuk melewati nilai pengaturan akan semakin besar.

Salah satu kesulitan dalam proses penalaan PID adalah menemukan kombinasi konstanta-konstanta PID yang tepat dan memiliki performa yang sama untuk setiap perubahan sistem atau perintah *set-point*. Pada pengujian dengan *set-point* 700 rpm, performa yang dihasilkan sangat baik untuk kedua kombinasi K_P , K_I dan K_D yang ditandai oleh osilasi yang singkat dan tidak terjadi *steady state error*. Namun hal itu tidak terjadi pada pengujian dengan *set-point* 1500 rpm yang menghasilkan osilasi selama pengujian berlangsung. Demikian pula pada pengujian dengan *set-point* 2000 rpm (Gambar 5a dan 5b), terlihat bahwa performa konstanta-konstanta PID yang digunakan tidak mampu mencapai nilai *set-point*, terutama dari $t = 0$ detik hingga $t = 2.6$ detik (Gambar 4a). Demikian pula pada Gambar 4b, *power* motor tidak cukup kuat untuk mencapai *set-point* dari $t = 0$ detik hingga $t = 2.4$ detik. Namun setelah itu, kedua pengujian memperlihatkan bahwa kecepatan motor mampu berada pada nilai *set-point*.

Hasil pengujian konstanta PID secara umum menunjukkan performa cukup baik dalam mengontrol kecepatan motor DC. Namun, hasil pengujian tersebut juga menunjukkan bahwa respon yang dihasilkan berbeda-beda untuk kecepatan motor yang berbeda. Kinerja konstanta PID pada kecepatan rendah (700 rpm) sangat baik, namun pada kecepatan sedang (1500 rpm) terjadi osilasi selama pengujian, sedangkan pada pengujian dengan kecepatan tinggi (2000 rpm) terlihat bahwa kecepatan motor tidak bisa mencapai nilai *set-point* pada respon awal. Oleh karena itu, masih diperlukan modifikasi konstanta-konstanta PID hasil penalaan sehingga diperoleh suatu kombinasi konstanta PID yang tepat yang dapat mengontrol kinerja motor DC untuk semua nilai *set-point*.

Simpulan

Metode IMC cukup handal untuk digunakan dalam melakukan penalaan PID. Nilai K_P , K_I , dan K_D yang diperoleh masing-masing sebesar 0.4013; 0.0988; dan 0.0176 untuk penalaan dengan PWM = 20% dan 0.2314; 0.0531; dan 0.0440 untuk penalaan dengan PWM = 80%. Hasil pengujian dengan motor DC menunjukkan bahwa kedua parameter-parameter PID cukup handal dalam pengontrolan kecepatan motor DC. Pada pengujian dengan *set-point* 700 rpm, performa PID sangat baik mengikuti nilai pengaturan yang ditandai oleh respon yang cepat, tidak adanya *steady state error* dan osilasi yang berlebihan. Namun pada pengujian dengan *set-point* 1500 rpm terjadi osilasi selama pengujian, sedangkan pengujian dengan *set-point* 2000 rpm, respon awal motor tidak mampu untuk mencapai nilai *set-point*.

Daftar Pustaka

- Ahn, K.K., D.Q. Truong. 2009. Online tuning fuzzy PID controller using robust extended Kalman filter. *Journal of Process Control* Vol. 19(6): 1011-1023. doi:10.1016/j.jprocont.2009.01.005.
- Ang, K.H., G. Chong, Y. Li. 2005. PID control system analysis, design, and technology. *IEEE transactions on control systems technology* Vol.13(4): 559-576.
- Begum, K.G., T. Radhakrishnan, A.S. Rao, M. Chidambaram. 2016. IMC based PID Controller Tuning of Series Cascade Unstable Systems. *IFAC-Papers On Line* 49(1): 795-800.
- Bi, Q., W.J. Cai, Q.G. Wang, C.C. Hang, E.L. Lee, Y. Sun, K.D. Liu, Y. Zhang, B. Zou. 2000. Advanced controller auto-tuning and its application in HVAC systems. *Control Engineering Practice* Vol. 8(6):633-644.
- Bolton, W. 2004. *Instrumentation and Control System*. Di dalam: Astranto S. *Sistem Instrumentasi dan Sistem Kontrol*. Penerbit Erlangga, Jakarta. Hal: 103 -122.
- Chiha, I., N. Liouane, P. Borne. 2012. Tuning PID Controller Using Multiobjective Ant Colony Optimization. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing* 2012:1-7. doi:10.1155/2012/536326
- Donghai, L., X. Yali, W. Weijie, S. Li. 2014. Decentralized PID Controller Tuning Based on Desired Dynamic Equations. *IFAC Proceedings Volumes* 47(3): 5802-5807.
- Duka, A.V., M. Dulău, S.E. Oltean. 2016. IMC Based PID Control of a Magnetic Levitation System. *Procedia Technology* Vol. 22: 592-599. doi:10.1016/j.protcy.2016.01.125
- Eriksson, L.M., M. Johansson. 2007. PID controller tuning rules for varying time-delay systems. *IEEE 2007 American Control Conference*. Hal: 619-625.

- Franklin, G.F., J.D. Powell, A. Emami-Naeini, J.D. Powell. 1994. *Feedback Control of Dynamic Systems*. Addison-Wesley Reading, Boston.
- Kumar, G.S., D. Jayaraj, A.R. Kishan. 2010. PSO based tuning of a PID controller for a high performance drilling machine. *International Journal of Computer Applications* Vol.1(19):12-18.
- Hang, C.C., K.J. Astrom, W.K. Ho. 1991. Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula. *IEEE Proceedings D-Control Theory and Applications*. Hal.: 111-118.
- Ho, W.K., K.W. Lim, W. Xu. 1998. Optimal gain and phase margin tuning for PID controllers. *Automatica* Vol. 34(8):1009-1014.
- Howell, M.N., M.C Best. 2000. On-line PID tuning for engine idle-speed control using continuous action reinforcement learning automata. *Control Engineering Practice* Vol.8(2):147-154.
- Jantzen, J. 1998. Tuning of fuzzy PID controllers. Technical University of Denmark, report.
- Jun, M., M.G. Safonov. 1999. Automatic PID tuning: An application of unfalsified control. *Proc. IEEE CCA/CACSD* 2:328-333.
- Kadu, C.B., C.Y. Patil. 2016. Design and Implementation of Stable PID Controller for Interacting Level Control System. *Procedia Computer Science* Vol. 79:737-746. doi:10.1016/j.procs.2016.03.097
- Kao, C.C., C.W. Chuang, R.F. Fung. 2006. The self-tuning PID control in a slider-crank mechanism system by applying particle swarm optimization approach. *Mechatronics* Vol.16(8):513-522. doi:10.1016/j.mechatronics.2006.03.007
- Karimi, A., D. Garcia, R. Longchamp. 2003. PID controller tuning using Bode's integrals. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* Vol. 11(6):812-821.
- Kaya, I. 2004. IMC based automatic tuning method for PID controllers in a Smith predictor configuration. *Computers & Chemical Engineering* Vol. 28(3):281-290. doi:10.1016/j.compchemeng.2003.01.001
- Kazemian, H.B. 2001. Comparative study of a learning fuzzy PID controller and a self-tuning controller. *ISA transactions* Vol. 40(3):245-253.
- Killingsworth, N.J., M. Krstic. 2006. PID tuning using extremum seeking: online, model-free performance optimization. *IEEE control systems* Vol. 26(1):70-79.
- Kim, D.H., W.P. Hong, J.I. Park. 2002. Auto-tuning of reference model based PID controller using immune algorithm. *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation* Hal.: 483-488.
- Kim, J.S., J.H. Kim, J.M. Park, S.M. Park, W.Y. Choe, H. Heo. 2008. Auto tuning PID controller based on improved genetic algorithm for reverse osmosis plant. *World Academy of Science, Engineering and Technology* Vol. 47: 384-389.
- Kumar, S.G., R. Jain, N. Anantharaman, V. Dharmalingam, K. Begum. 2008. Genetic algorithm based PID controller tuning for a model bioreactor. *Indian chemical engineer* Vol.50(3):214-226.
- Lee, C.H., C.C. Teng. 2003. Calculation of PID controller parameters by using a fuzzy neural network. *ISA Transactions* Vol.42(3): 391-400. doi:10.1016/s0019-0578(07)60142-6
- Li, X.F., G. Chen, Y.G. Wang. 2016a. IMC-PID controller design for power control loop based on closed-loop identification in the frequency domain. *IFAC-Papers On Line* Vol. 49(4):79-84.
- Li, X.F., D.J. Ding, Y.G. Wang, Z. Huang. 2016b. Cascade IMC-PID control of superheated steam temperature based on closed-loop identification in the frequency domain. *IFAC-Papers On Line* Vol. 49(18):91-97.
- Li, Y., K.H. Ang, G.C. Chong. 2006. PID control system analysis and design. *IEEE Control Systems* Vol. 26(1):32-41.
- Lin, F., R.D. Brandt, G. Saikalis. 2000. Self-tuning of PID controllers by adaptive interaction. *Proceedings of the American Control Conference*. Hal.: 3676-3681.
- Martins, F.G. 2005. Tuning PID controllers using the ITAE criterion. *International Journal of Engineering Education* Vol. 21(5):867.
- Nhon, P., I. Elamvazuthi, H. Fayek, S. Parasuraman, M.A. Khan. 2014. Intelligent control of rehabilitation robot: Auto tuning PID controller with interval type 2 Fuzzy for DC servomotor. *Procedia Computer Science* Vol. 42:183-190.
- Radite, P.A.S., W. Hermawan, A. Azis, B. Budiyo. 2011. Design and performance test of embedded module metering device for variable rate fertilizer applicator. *Proc. of ICORAS Int'l Conference on Robotic Automation Sistem, Terengganu Malaysia*; paper E-145: page 149-153.
- Radite, P.A.S., M.T. Sapsal, W. Hermawan, B. Budiyo. 2012. Variable rate Fertilizer applicator based on AVR microcontroller. *Proceeding of AFITA/WCCA (20)-02; 2012; Taipei, Taiwan*. Hal: 141
- Shahrokhi, M., A. Zomorodi. 2013. Comparison of PID controller tuning methods. Department of Chemical & Petroleum Engineering, Sharif University of Technology.
- Tan, W., J. Liu, P. Tam. 1998. PID tuning based on loop-shaping H^∞ control. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications* Vol. 145(6):485-490.
- Varol, H.A., Z. Bingul. 2004. A new PID tuning technique using ant algorithm. *Proceedings of the 2004 American Control Conference*. Hal.: 2154-2159.
- Zhang, J., J. Zhuang, H. Du, S.A. Wang. 2009. Self-organizing genetic algorithm based tuning of PID controllers. *Information Sciences* Vol. 179(7):1007-1018. doi:10.1016/j.ins.2008.11.038