

## APLIKASI IMC BERBASIS STRATEGI PENALAAAN PENGENDALI PID DIGITAL PADA SISTEM PEMANAS UDARA

Ainie Khuriati Riza Sulistiati

Laboratorium Instrumentasi Elektronika , Jurusan Fisika , Universitas Diponegoro

### Abstract

This paper investigated an application of the methodology that was developed by Rivera, a methodology to obtain reduced-order models that satisfy the Prett-Garcia digital PID tuning rules, using prefiltered ARX estimation as a basis. The method was applied as the temperature control system on the air heater. IMC-PID controller is not only superior but it has a simple and general structure such as that of a PID controller too.

**Keywords:** PID digital , IMC, ARX model.

### Abstrak

Makalah ini membahas tentang aplikasi dari metodologi yang dikembangkan oleh Rivera, metodologi untuk mendapatkan model orde berkurang yang memenuhi aturan penalaan PID digital Prett-Garcia, menggunakan penapis awal estimasi ARX sebagai dasar. Metode ini diaplikasikan sebagai system pengendali suhu dalam system pemanas . Pengendali IMC-PID tidak hanya unggul tetapi juga memiliki kesederhaan dan struktur umum seperti pengendali PID.

**Kata kunci:** PID digital , IMC, model ARX.

### Pendahuluan

Memasuki akhir abad 20 ini, sejalan dengan keberhasilan perkembangan mikroprosesor dan komputer, dunia diserbu oleh kehadiran berbagai produk serba otomatis. Peralatan elektronik seperti telepon, AC, refrigerator, radio dan TV telah digunakan sistem kendali digital modern seperti *fuzzy* dan *neural network*. Walaupun demikian Pengendali Proporsional Integral Derivative (PID) tetap merupakan salah satu pengendali yang banyak digunakan dalam proses industri [4 ], dan dapat diimplementasikan dalam berbagai cara: berdiri sendiri sebagai regulator atau sebagai komponen dari DCS. Hal ini tidak hanya disebabkan karena strukturnya yang sederhana, secara konseptual mudah dipahami, tetapi juga fakta menunjukkan bahwa algoritma

memberikan kinerja memadai dalam sebagian besar penerapannya [2].

### Dasar Teori

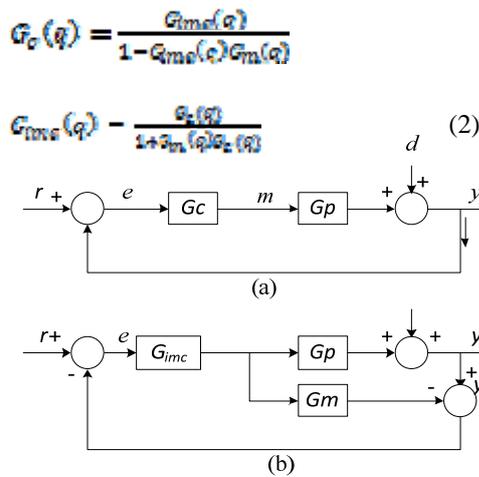
#### 1. Prosedur perancangan PID Digital

Implementasi komersial yang umum dari pengendali PID adalah bentuk diskret dari hukum pengendali PID ideal kontinyu. Dituliskan dalam bentuk persamaan diferensi untuk waktu pencuplikan  $T$ .

$$m(t) = m(t-1) + \left( (K_p + \frac{K_p T}{T_i} + \frac{K_p T_d}{T}) e(t) + \left( -K_p - \frac{K_p T_d}{T} \right) e(t-1) + \frac{K_p T_d}{T} e(t-2) \right) \quad (1)$$

Prosedur perancangan PID digital yang didasarkan pada Pengendalian model Internal (Internal model control, IMC) dikembangkan oleh Pret dan Garcia [5]. Diagram skematik dari pengendali IMC

diberikan dalam gambar 1 dengan  $G_p$  adalah proses stabil yang dikendalikan,  $G_m$  adalah model proses, dan  $G_{imo}$  adalah pengendali IMC. Prosedur perancangan pengendalian IMC diberikan secara jelas dalam monograf dari Morari & Zafiriou [6]. Hubungan antara pengendali klasik  $G_c$  dan pengendali IMC  $G_{imo}$  adalah [4]



Gambar 1. (a). Struktur umpan balik klasik (b) Struktur umpan balik IMC

Prosedur perancangan yang dapat diimplementasikan dalam program adalah prosedur pengendalian dengan PID digital. Prosedur perancangan dalam pengendali mempunyai bentuk:

$$\Delta m(t) = K_c \left[ \begin{matrix} e(t) - \tau_I e(t-1) \\ + \tau_D e(t-2) \end{matrix} \right] + \tau_F \Delta m(t-1) \quad (3)$$

Dengan  $\Delta m(t) = m(t) - m(t-1)$  adalah perubahan keluaran pengendali,  $e(t) = r - y(t)$  adalah galat pelacakan setpoint. Parameter  $K_c, \tau_I, \tau_D,$  dan  $\tau_F$  adalah koefisien persamaan diferensi tetapi tidak sama dengan parameter pada pengendali kontinyu.

Aturan yang digunakan untuk merancang pengendali [5]:

Aturan 1: Definisikan  $G_{mm}$ . Zero dari  $G_{mm}(q)$  adalah pole dari  $G_m(q)$ .

Aturan 2 : Pole  $G_{mm}(q)$  dipilih sebagai berikut:

- a. Menggunakan zero  $G_m(q)$  dengan bagian nyata positif yang berada dalam lingkaran satuan
- b. Menggunakan kebalikan dari zero  $G_m(q)$  dengan bagian nyata positif yang berada diluar lingkaran satuan
- c. Menggunakan sebuah pole pada titik asal untuk setiap zero  $G_m(q)$  dengan bagian nyata negatif

Aturan 3: Pole tambahan  $G_{mm}(q)$  pada titik asal harus ada karena tunda pencuplikan inheren

Aturan 4 : Faktor konstanta harus dimasukkan dalam  $G_{mm}(q)$  sehingga

$$\lim_{q \rightarrow 1} G_m(q)G_{mm}(q) = 1 \quad (4)$$

Aturan 5 : Menambahkan penapis pelewat rendah. Untuk masukan step, bentuk yang sesuai:

$$f(q) = \frac{(1-\delta)q^{-1}}{q^{-1}-\delta} \quad (5)$$

Untuk fungsi lereng, perlu menambahkan persyaratan:

$$\lim_{q^{-1} \rightarrow 1} \frac{d(G_m G_{mm} f)}{dq^{-1}} = 0 \quad (6)$$

Yang mendefinisikan  $f(q)$  sebagai:

$$f(q) = \frac{(1-\delta)q^{-1}}{q^{-1}-\delta} \frac{[(1+\delta) - (1-\delta)(a_m a_{mm})'(1)]q^{-1} + [-2\delta + (1-\delta)(a_m a_{mm})'(1)]}{q^{-1}-\delta} \dots (7)$$

$(G_m G_{mm})'(1)$  menyatakan evaluasi derivative  $(G_m G_{mm})'$  terhadap  $q^{-1}$  pada  $q^{-1} = 1$ . Akhirnya diperoleh bentuk  $G_m$  sebagai

$$G_{imo} = G_{mm}(q)f(q) \quad (8)$$

**2. Pengendalian Model Internal (IMC, Internal Model Control)**

IMC adalah strategi pengendalian didasarkan pada model matematik proses untuk merancang pengendali [5] IMC. Ide perancangan IMC adalah model plan harus paralel dengan plan yang sesungguhnya, dan sebagai pendekatan pengendali inversi dinamis model, inversi dari fase minimum model diambil sebagai pengendali IMC dan penapis pelewat rendah dirancang untuk realisasi fisik pengendali[1].

Jika system stabil

$$y_p = \frac{G_p(q)G_{imc}(q)}{1+G_{imc}(q)(G_p(q)-G_m(q))}r + \frac{1-G_{imc}(q)G_p(q)}{1-G_{imc}(q)(G_p(q)-G_m(q))}d \tag{9}$$

Apabila model kita bagus,  $G_p = G_m$  dan  $G_m$  adalah proses dengan fase minimum,  $G_{imc} = G_m^{-1}$ . Dari pers (9), gangguan dapat dihilangkan untuk mewujudkan pelacakan objektif terhadap masukan acuan. Oleh karena itu hubungan antara setpoin  $r$ , gangguan  $d$ , keluaran  $y_p$  dan galat pengendalian  $e_c = r - y_p$  yang dinyatakan sebagai :

$$\begin{aligned} y_p(q) &= G_m(q)G_{imc}(q)[r(q) - d(q)] + d(q) \\ y_p(q) &= \tilde{h}(q)[r(q) - d(q)] + d(q) \\ e_c(q) &= (1 - G_p(q)G_{imc}(q))[r(q) - d(q)] \\ e_c(q) &= \tilde{s}(q)[r(q) - d(q)] \end{aligned} \tag{10}$$

$\tilde{h}(q)$  menyatakan fungsi kepekaan komplementer, yang menggambarkan tanggapan antara  $r$  dan  $y_p$

IMC memiliki sifat sebagai berikut [1]:

- (1) Stabilitas Dual: Asumsikan  $G_p = G_m$ , dan jika pengendali dan proses stabil, struktur IMC menjamin stabilitas loop tertutup.
- (2) Kendali Sempurna: Asumsikan  $G_p = G_m$  dan sistem loop tertutup stabil,

sementara  $G_{imc} = G_m^{-1}$  dan, maka tidak terdapat kesalahan keadaan tunak keluaran untuk varians set-point dan gangguan.

Dari struktur IMC, dapat dilihat bahwa untuk sinyal kendali masukan eksternal, sistem IMC menjadi sistem loop terbuka, jika sistem tidak memiliki model kesalahan. Umpan balik adalah untuk membuat umpan balik perturbasi keluaran yang terukur kembali ke masukan pengendali. Melalui kendali umpan-maju, pengaruh gangguan sebagian dapat dihilangkan. Oleh karena itu, sistem stabilitas loop tertutup hanya tergantung pada stabilitas bagian umpan-maju. Kendali IMC menunjukkan respon dinamik yang lebih baik, stabilitas sistem, dan ketahanan dibandingkan dengan kontrol umpan balik tradisional.

**3. Model ARX menggunakan filter**

Hubungan masukan-keluaran model ARX yang paling sederhana diberikan dalam kompak sebagai berikut:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \tag{12}$$

Polynomial  $A(q)$  dan  $B(q)$  diberikan oleh:

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \\ B(q) &= b_1q^{-1} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b} \end{aligned}$$

Model *finite impulse response* (FIR)

$$y(t) = B'(q)u(t-1)$$

$$B'(q) = b_1'q^{-1} + \dots + b_{n_b}'q^{-n_b} \tag{13}$$

Menggunakan penapis pada masukan dan keluaran

$$y_F = L(q)y(t) \tag{14}\#$$

$$w_F = L(q)u(t) \tag{15}$$

Penapis galat penduga melalui penapis linier  $L(q)$ :

$$e_F = L(q)e(t) \tag{16}$$

Sehingga

$$e_F = L(q)A(q) \left( B'(q) - \frac{B(q)}{A(q)} \right) u(t-1) \dots\dots\dots (17)$$

Untuk mendapatkan pencocokan terbaik antara data terukur dan model, disini kita gunakan criteria kuadrat [Ljung],

$$V = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |e_F(t)|^2 \dots\dots\dots (18)$$

Kriteria diatas dapat dinyatakan dalam kawasan frekuensi menggunakan hubungan Parseval [3],

$$V = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left| B'(e^{j\omega}) - \frac{B(e^{j\omega})}{A(e^{j\omega})} \right|^2 |A(e^{j\omega})|^2 |L(e^{j\omega})|^2 \theta_u(\omega) d\omega \dots\dots\dots (19)$$

Yang dapat diselesaikan dengan estimator relevan-kendali dengan menggunakan masukan impuls diperoleh [5]:

$$L(q) = B(q)^{-1} \hat{B}(q) \hat{K}(q) (r(q) - d(q)) \dots\dots\dots (20)$$

Didefinisikan

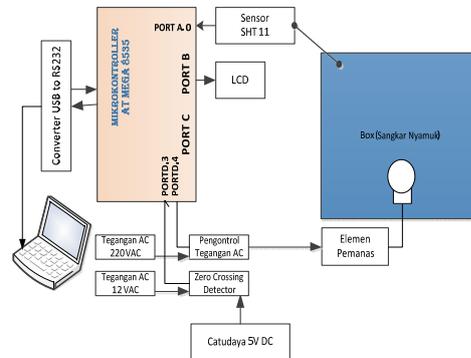
$$e_m(q) = \left( B'(q) - \frac{B(q)}{A(q)} \right) \frac{A(q)}{B(q)} \dots\dots\dots (21)$$

**Metode Penelitian**

**1. Rancangan Eksperimen**

Sistem yang digunakan dalam percobaan adalah system pemanas udara dalam sangkar nyamuk. Untuk menunjukkan pelacakan setpoint, setpoint diubah secara mendadak melalui computer yang terhubung ke mikrokontroler ATMEGA 8535 melalui port USB. Suhu sangkar nyamuk diukur dengan menggunakan sensor SHT11, hasilnya dikirimkan ke mikrokontroler melalui port A0. Diagram skematik yang

dipergunakan untuk pengambilan data dan untuk aplikasi dari algoritma yang diusulkan, ditunjukkan gambar 2.



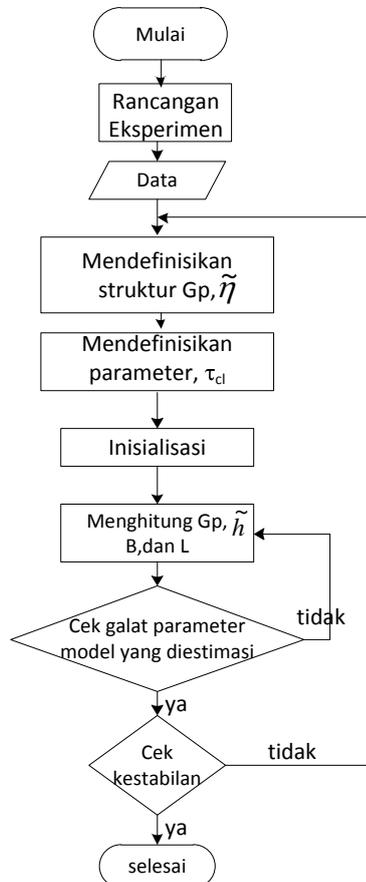
Gambar 2 Diagram skematis dari system yang dirancang

**2. Algoritma Estimator ARX Menggunakan Penapis awal.**

Perlu ditekankan bahwa akurasi model adalah faktor yang sangat penting untuk mendapatkan keberhasilan pengendali PID dengan optimasi berdasarkan IMC. Sebelum optimalisasi parameter PID, model plan harus diperoleh. Model sederhana diperoleh dengan menggunakan metode identifikasi yang didasarkan pada uji tanggapan langkah. Aturan penalaan PID digital yang dikembangkan oleh prett dan Garcia menawarkan kemungkinan kinerja tinggi untuk implementasi pengendali PID diskrit terus menerus, sementara tetap mempertahankan kemudahan dalam penggunaannya .

Makalah ini membahas tentang aplikasi dari algoritma yang dikembangkan oleh Rivera. Algoritma ini mempertajam dan memperluas kegunaan dari aturan Prett-Garcia yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah praktis yang dihadapi dalam proses industri. Diagram alir untuk mengestimasi model matematis dari system pemanas udara dengan

estimator ARX diberikan dalam gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir estimator ARX menggunakan filter awal

Langkah 1 : Mendefinisikan struktur dan parameter

Untuk menerapkan perangkat lunak yang dikembangkan untuk mengidentifikasi model plan , terlebih dahulu memilih struktur dari  $G_p$  dan  $\tilde{h}$  dari table 1. Penapis yang dipilih adalah

$$\delta = e^{-T/\tau_{ci}}$$

Besarnya  $\tau_{ci}$  adalah kontanta lup tertutup merupakan satu-satunya parameter penalaan yang besarnya dipilih oleh pengguna untuk mencapai kompromi yang sesuai antara kinerja dan ketahanan.  $\tau_{ci}$  lebih kecil akan memberikan tanggapan lup

tertutup lebih cepat tetapi peubah yang dimanipulasi bergerak secara cepat, sementara nilai yang lebih besar akan memberikan tanggapan lebih lambat namun lehi halus [6].

Langkah 2 :Inisialisasi

Disini digunakan masukan  $u$  pulsa satuan dan  $y$  tanggapan impuls terbatas.

Model proses yang digunakan diambil dari table 1 :

$$G_p = \frac{z(q^{-1}-\beta)}{(q^{-1}-\alpha_1)(q^{-1}-\alpha_2)}, \beta = 1, \tilde{h} = \frac{1-\beta}{q^{-1}-\delta}$$

Aspek penting dalam perancangan pengendali PID adalah penentuan parameter PID agar memberikan kinerja yang baik. Untuk menentukan parameter pada pers (3) dengan meminimisasi pers. (17). Penalaan parameter PID dari Pret-Garcia diberikan oleh:

$$KK_p = 1 - \delta, \tau_I = \alpha_1 + \alpha_2$$

$$\tau_D = \alpha_1\alpha_2, \tau_F = \beta, r - d = \frac{q^{-1}}{q^{-1} - 1}$$

Konstanta lup tertutup yang dipilih  $\tau_{ci} = 3$ .

Langkah 3: Menghitung model proses dan parameter lainnya

Parameter digunakan untuk menggambarkan model plan. Dari inisialisasi, dengan menggunakan iterasi akan diperoleh model proses  $G_p$  dengan memperbaharui nilai  $B$  dan  $\tilde{h}$  dan dengan demikian menentukan  $L(q)$  yang baru. Untuk estimator ARX digunakan masukan  $u(t)$  pulsa satuan,  $u_F = L(q)u(t)$  dan  $y_F = L(q)y(t)$ .

Kedua parameter ini digunakan untuk mengestimasi model orde berkurang  $G_p$ .

Langkah 4 : Memeriksa galat dari parameter yang diestimasi.

Untuk mengakhiri iterasi dibatasi oleh nilai galat mutlak dan galat relative

Tabel 1. Penalaan berbasis IMC untuk pengendali PID menggunakan model sederhana[4]

	$g(z)$	$h(z)$	$KK_c$	$\tau_I$	$\tau_D$	$\tau_F$
$A^*$	$\frac{K}{z-a}$	$\frac{1-\beta}{z-\beta}$	$1-\beta$	$a$	0	0
$B^*$	$\frac{K(z-\alpha)}{(z-a_1)(z-a_2)}$	$\frac{1-\beta}{z-\beta}$	$1-\beta$	$a_1 + a_2$	$a_1 a_2$	$\beta$
$C^*$	$\frac{K(z-\alpha)}{(z-a_1)(z-a_2)}$	$\frac{1-\beta z-\beta}{z-\beta(1-\beta)}$	$\frac{1-\beta}{-\beta}$	$a_1 + a_2$	$a_1 a_2$	$\frac{\beta(1+\beta)}{\beta} = 1$
$D^*$	$\frac{K(z-\alpha)}{(z-a_1)(z-a_2)}$	$\frac{1-\beta z-\beta}{z-\beta(1-\beta)z}$	$\frac{1-\beta}{1-\beta}$	$a_1 + a_2$	$a_1 a_2$	$\frac{(1-\beta)\beta}{1-\beta}$
$E^*$	$\frac{K(z-\alpha)}{(z-a_1)(z-a_2)}$	$\frac{1-\beta}{z-\beta} \frac{(z-\beta)\beta}{(z-\beta)(z+(1-\beta)\beta)}$	$\frac{\beta(1-\beta)}{\beta-\beta}$	$a_1 + a_2$	$a_1 a_2$	0
$F^*$	$\frac{K}{z-1}$	$\frac{1-\beta z-1-\beta}{z-\beta} \frac{1-\beta}{z-\beta}$	$a(1-\beta)$	$\frac{1+\beta}{2}$	0	0
$G^{*-1}$	$\frac{K(z-\beta)}{(z-a)(z-1)}$	$\frac{1-\beta z-1-\beta}{z-\beta} \frac{1-\beta}{z-\beta}$	$a(1-\beta)$	$\frac{1+\beta+2a}{2}$	$\frac{(1+\beta)a}{2}$	$\beta$
$H^{*-1}$	$\frac{K(z-\beta)}{(z-a)(z-1)}$	$\frac{1-\beta z-\beta [1+\beta-\beta(1-\beta)]z+1-\beta}{z-\beta(1-\beta)}$	$\frac{1-\beta [1+\beta-\beta(1-\beta)]}{\beta(1-\beta)}$	$a - \frac{2\beta-\beta}{1+\beta-\beta(1-\beta)}$	$\frac{-2a\beta-\beta}{1+\beta-\beta(1-\beta)}$	$\frac{2\beta^2 + \beta(1+\beta)\beta-1}{-\beta(1-\beta)}$
$I^{*-1}$	$\frac{K(z-\beta)}{(z-a)(z-1)}$	$\frac{1-\beta z-\beta [1+\beta-\beta(1-\beta)]z+1-\beta}{z-\beta(1-\beta)}$	$\frac{1-\beta [1+\beta-\beta(1-\beta)]}{\beta(1-\beta)}$	$a - \frac{2\beta-\beta-1}{1+\beta-\beta(1-\beta)}$	$\frac{-a\beta-\beta-1}{1+\beta-\beta(1-\beta)}$	$\frac{-\beta^2-\beta(1+\beta)\beta-1}{(1-\beta)^2}$

Langkah 5 : Memeriksa kestabilan system.

Setelah langkah ke empat dicapai. Langkah selanjutnya adalah validasi model yang dipilih, model harus tidak mempunyai pole yang tidak stabil. Karena system yang dipilih adalah system diskret, letak pole-polenya harus berada di dalam lingkaran sataun.

**Hasil Dan Pembahasan**

Data dari hasil pengukuran suhu dengan memberikan masukan tangga, parameter model yang diperoleh:

$p_1 = 0.9866$

$p_2 = -0.0210$

Kedua pole terletak di dalam lingkaran satuan, menunjukkan bahwa model yang diperoleh memenuhi syarat kestabilan.

Parameter-parameter PID digital diperoleh dengan menggunakan aturan

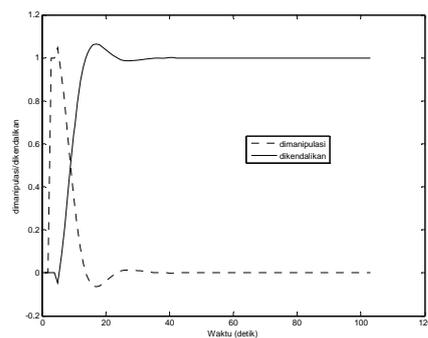
dari Pret-Garcia dengan memberikan gangguan fungsi tangga (ditunjukkan gambar 4) adalah sebagai berikut:

$K_c = -0.0153$

$\tau_I = 0.9656$

$\tau_D = -0.0207$

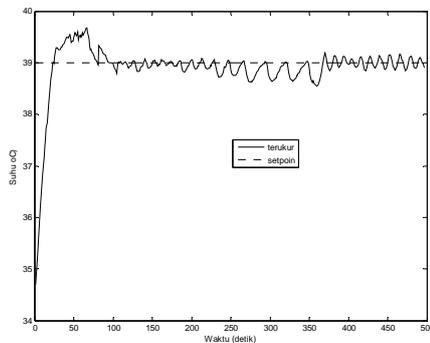
$\tau_F = -1.0879$



Gambar 4. Simulasi dari model proses yang diperoleh dengan PID-IMC

Hasil eksperimental dari sistem pemanas dari suhu 34,7 – 39°C dengan menggunakan hasil penalaan dari model, ditunjukkan pada gambar 5. Waktu naik

sebesar 12 detik, overshoot 15%, waktu penempatan sebesar 360 detik. Dari model diperoleh waktu naik 6 detik, overshoot 6,49%, dan waktu penempatan 18 detik.



Gambar 5. Hasil eksperimental dari sistem pemanas dari suhu 34,7 – 39°C dengan menggunakan parameter yang diperoleh hasil penalaan dari model 5.

### Kesimpulan

Sebuah unit Pemanas udara yang disediakan dalam sangkar nyamuk sangat penting sebagai sarana untuk melakukan penelitian terhadap siklus kehidupan dari nyamuk terutama nyamuk demam berdarah yang sangat dipengaruhi oleh suhu. Makalah ini menunjukkan aplikasi raktis dari IMC-PID dalam unit. Dari kontrol efektivitas tuning kontroler, dapat dilihat bahwa pengendali mempunyai tanggapan yang cukup ditunjukkan oleh waktu naik yang relatif walau masih menimbulkan *overshoot* yang agak besar

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada FSM atas dukungannya dan mahasiswa saya Ibnu Sulistiono yang telah membantu dalam pembuatan alatnya.

### Daftar Pustaka

- [1]. Li D , Zeng F, Jin Q , Pan L, Applications of an IMC based PID Controller tuning strategy in atmospheric and vacuum distillation units, *Nonlinear Analysis: Real World Applications* 10 (2009) 2729\_2739
- [2]. Liu. G.P, Daley S, Optimal-tuning PID control for industrial systems, *Control Engineering Practice* 9 (2001) 1185–1194
- [3]. Ljung, L. *System Identification: Theory for the User*, Prentice-Hall, New Jersey, 1987
- [4]. Rivera D, E., Gaikwad S, V, “Digital PID Controller Design Using ARX Estimation” *Computers & Chemical Engineering* Volume 20, Issue 11, 1996, Pages 1317–1334
- [5]. Rivera D, E., Morarl, M, Skogestad S, *Internal Model Control. 4. PID Controller Design* *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 1986, 25, 252-26
- [6]. Wang Q, G., Hang C. C, Yang X, P, *Single-loop controller design via IMC principles*, *Automatica* 37 (2001) 2041-2048

