

**APLIKASI KENDALI ADAPTIF PADA SISTEM
PENGATURAN TEMPERATUR CAIRAN DENGAN
TIPOLOGI KENDALI MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROLLER (MRAC)**

Ferry Rusmawan¹, Iwan Setiawan, ST. MT.², Wahyudi, ST. MT.²

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia
E-mail: Ferry_Rusmawan@yahoo.com

Abstrak

Model Reference Adaptive Control (MRAC) merupakan salah satu skema kendali adaptif dimana performansi keluaran sistem (proses) mengikuti performansi keluaran model referensinya. Parameter-parameter kontroler diatur (mekanisme pengaturan) berdasarkan pada error yang merupakan selisih antara keluaran proses dengan keluaran model. Dalam menentukan metode pengaturan parameter kontroler ada beberapa pendekatan diantaranya dengan MIT rule dan Teori kestabilan Lyapunov dimana keduanya memiliki kecepatan adaptasi atau konvergensi yang berbeda karena memiliki formulasi dan algoritma yang berbeda dalam melakukan pengaturan parameter. Pada tugas akhir ini dilakukan pengujian terhadap unjuk kerja sistem kontrol adaptif MRAC baik dengan pendekatan MIT rule maupun dengan pendekatan Teori kestabilan Lyapunov dalam mengendalikan suhu cairan secara on-line. Pengujian terhadap kedua sistem tersebut dilakukan dengan pengujian pengaruh besar gain adaptasi, pengujian referensi naik, dan pemberian gangguan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pemilihan nilai gain adaptasi yang kecil baik pada metode adaptasi MIT Rule maupun Lyapunov menghasilkan respon proses yang lambat dalam mengikuti model referensinya, sebaliknya nilai gain adaptasi yang besar menghasilkan sistem yang berosilasi. Metode adaptasi Lyapunov memiliki kemampuan mengikuti model referensi yang lebih baik terhadap perubahan referensi naik yang diberikan dari pada metode adaptasi MIT Rule, namun dalam mengatasi gangguan metode adaptasi MIT Rule memiliki kemampuan lebih baik dari pada metode adaptasi Lyapunov yang dapat dilihat dari waktu yang dibutuhkan untuk mengatasi gangguan yang lebih singkat.

Kata kunci : Teknik Kendali Adaptif, Model Reference Adaptive Control, MIT Rule, kestabilan Lyapunov orde satu, Plant Pengatur Temperatur cairan, Gain adaptation.

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebuah pendekatan dalam pengendalian *plant* yang memiliki kendala parameter *plant* sulit ditentukan karena kompleksitas *plant*, kondisi dinamik *plant* (proses), maupun adanya karakteristik dari gangguan (*Disturbance*) yang bervariasi dapat dilakukan dengan menggunakan sistem kontrol adaptif. Sistem kontrol adaptif memiliki kontroler dimana parameter-parameternya dapat diatur (*adjustable parameters*) dan memiliki mekanisme pengaturan terhadap parameter-parameternya (*mechanism for adjusting the parameters*), oleh karena itu ketika karakteristik sistem proses atau karakter gangguan berubah maka sistem dapat beradaptasi dengan melakukan mekanisme pengaturan terhadap parameter-parameter kontroler yang diatur sehingga didapatkan keluaran sistem sesuai dengan referensinya.

Model Reference Adaptive Control (MRAC) merupakan salah satu skema kendali adaptif

dimana performansi keluaran sistem (proses) mengikuti performansi keluaran model referensinya. Parameter-parameter kontroler diatur (mekanisme pengaturan) berdasarkan pada *error* yang merupakan selisih antara keluaran proses dengan keluaran model. Dalam menentukan metode pengaturan parameter kontroler ada beberapa pendekatan diantaranya dengan *MIT rule* dan teori kestabilan *Lyapunov* dimana keduanya memiliki kecepatan adaptasi atau konvergensi yang berbeda karena memiliki formulasi dan algoritma yang berbeda dalam melakukan pengaturan parameter. Perancangan sebuah sistem kontrol dibutuhkan pemahaman yang detail mengenai metode yang akan diaplikasikan, baik itu laju konvergensi maupun kecepatan beradaptasi terhadap perubahan proses maupun gangguan terutama pada *plant* pengatur suhu. Hal ini karena untuk kasus tertentu suatu metode sistem kontrol performansinya bagus untuk sistem proses tertentu namun untuk sistem lain performansinya tidak memuaskan.

Tugas akhir ini dibuat untuk melakukan pengujian terhadap unjuk kerja sistem kontrol

1) Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP

2) Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro UNDIP

adaptif MRAC baik dengan pendekatan MIT rule maupun dengan pendekatan teori kesetabilan Lyapunov dalam mengendalikan suhu cairan secara on-line. Pengujian terhadap kedua system tersebut dilakukan dengan pengujian pengaruh besar gain adaptasi, konstanta waktu model, pengujian referensi naik, pengujian referensi turun, dan pemberian gangguan.

1.2 Tujuan

Tujuan pembuatan tugas akhir ini adalah membandingkan unjuk kerja sistem kontrol adaptif MRAC dengan pendekatan MIT rule dan sistem kontrol adaptif MRAC dengan pendekatan Teori kesetabilan Lyapunov dalam mengendalikan suhu cairan secara on-line.

1.3 Pembatasan Masalah

Pertimbangan kompleksnya permasalahan yang terdapat dalam sistem ini, maka perlu adanya batasan-batasan untuk menyederhanakan permasalahan ini, yaitu:

1. Plant yang digunakan adalah plant pengatur suhu cairan dengan pengaturan sudut pemicuan.
2. Volume cairan dalam tabung sebanyak 9,37 liter, sedangkan debit air masuk dibuat sama dengan debit air keluar yaitu sebesar 18,52 mililiter tiap satu detik.
3. Range pengaturan yang diperbolehkan adalah 32 °C sampai 45 °C.
4. Tidak dibahas pemodelan sistem secara matematis.
5. Mekanisme pengaturan parameter kontroler (*adjustment mechanism*) pada yang diuji adalah skema control adaptif MRAC menggunakan MIT Rule dan skema control adaptif MRAC dengan teori kesetabilan Lyapunov.
6. Dalam membandingkan unjuk kerja masing-masing metode tidak digunakan analisis kestabilan atau konvergensi sistem secara formulasi tetapi menggunakan analisis respon keluaran terhadap masukan.
7. Teori kesetabilan Lyapunov yang digunakan adalah kesetabilan Lyapunov pada orde satu.
8. Pengujian terhadap kedua sistem tersebut dilakukan dengan pengujian pengaruh besar gain adaptasi, pengujian referensi naik, dan pemberian gangguan.
9. Suhu yang dijadikan informasi untuk pengolahan pada komputer adalah hasil bacaan sensor LM35.
10. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah Delphi 7.

II. DASAR TEORI

2.1 Teori Kesalahan Keadaan Tunak Sistem Orde Satu

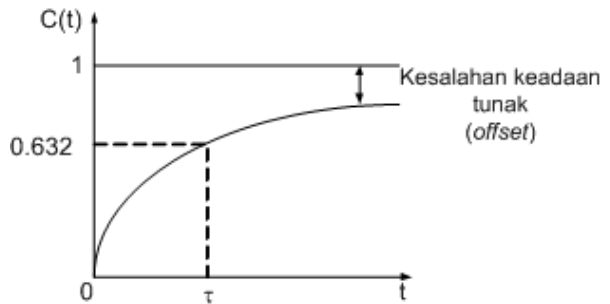
Model umum fungsi alih sistem orde satu ditunjukkan sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b}{s+a} \dots\dots\dots (1)$$

dalam bentuk lain dapat dituliskan sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b/a}{1/a.s+1} \dots\dots\dots (2)$$

dari persamaan tersebut dapat diketahui nilai dari gain statis $K=b/a$ dan konstanta waktu $\tau = 1/a$.



Gambar 1 Respon kesalahan keadaan tunak sistem.

Gambar 1 menunjukkan respon sistem orde satu dimana keadaan tunak respon tidak mencapai nilai referensinya. Selisih antara nilai referensi dengan nilai keadaan tunak respon sistem disebut sebagai suatu kesalahan keadaan tunak atau *offset* :

$$E(s) = R(s) - C(s)$$

Persamaan ini disubstitusikan dengan persamaan (1) sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$E(s) = \left(1 - \frac{b}{s+a}\right)R(s) \dots\dots\dots (3)$$

sehingga jika masukan berupa tegangan step, maka kesalahan keadaan tunaknya:

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s.E(s)$$

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \left(1 - \frac{b}{s+a}\right) \cdot \frac{1}{s}$$

$$e(\infty) = 1 - \frac{b}{a} \dots\dots\dots (4)$$

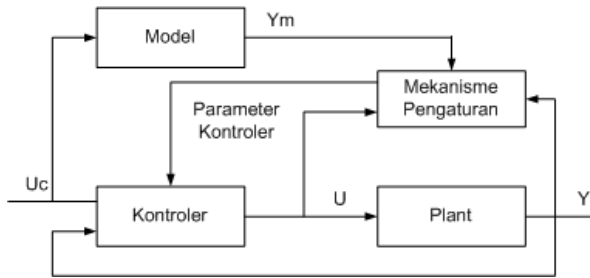
Jadi agar kesalahan keadaan tunaknya nol, maka dipilih nilai b sama dengan a , selanjutnya kriteria ini digunakan dalam menentukan model sistem.

2.2 Sistem Kontrol Adaptif MRAC (*Model Reference Adaptive Control*)^[2]

Sistem kontrol adaptif adalah sistem kontrol dimana parameter-parameternya dapat diatur dan juga memiliki mekanisme untuk mengatur

1) Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP
2) Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro UNDIP

parameter-parameter tersebut. *Model Reference Adaptive Control (MRAC)* merupakan salah satu skema kendali adaptif dimana performansi keluaran sistem (proses) mengikuti performansi keluaran model referensinya. Parameter-parameter kontroler diatur melalui mekanisme pengaturan yang didasarkan pada *error* yang merupakan selisih antara keluaran proses dengan keluaran model referensi. Blok diagram skema *Model Reference Adaptive Control (MRAC)* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Blok diagram skema *Model Reference Adaptive Control (MRAC)*.

Skema sistem *MRAC* memiliki dua *loop* yaitu *loop* pertama (*inner loop*) *loop* umpan balik antara proses dan kontroler sedang *loop* yang kedua (*outer loop*) adalah *loop* yang mengubah parameter-parameter kontroler berdasarkan sinyal *error* $e = y - y_m$. Pengaturan dilakukan dengan meminimalkan sinyal *error*, sehingga keluaran sistem (y) sesuai dengan keluaran model referensinya (y_m). Mekanisme pengaturan pada *Model Reference Adaptive Control (MRAC)* terhadap parameter-parameternya dapat dilakukan dengan beberapa metode diantaranya dengan *MIT Rule* dan Teori kestabilan *Lyapunov*.

2.2.1 MIT Rule

Berikut ini akan jabarkan *MIT Rule* pada sistem *loop* tertutup yang mana kontrolernya memiliki sebuah parameter yang dapat diatur berupa θ . Respon sistem *loop* tertutup ditentukan oleh model yang keluarannya dinotasikan y_m , *output* proses dinotasikan sebagai y . *Error* merupakan selisih antara keluaran y dari sistem *loop* tertutup dan keluaran dari model y_m . *Error* dinotasikan sebagai e . Pengaturan parameter dilakukan dengan meminimalkan fungsi kerugian (*The loss function, $J(\theta)$*):

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \dots\dots\dots(5)$$

agar J kecil dilakukan perubahan parameter pada *gradient* negatif dari J .

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \dots\dots\dots(6)$$

ini dinamakan sebagai aturan *MIT (MIT Rule)*.

Turunan parsial $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ disebut sebagai turunan kepekaan (*sensitivity derivative*) sistem yang menunjukkan bagaimana *error* dipengaruhi oleh parameter yang dapat diatur (*adjustable parameter*). Jika diasumsikan parameter berubah lebih lambat dari variable lain dari sistem, $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ dapat diasumsikan konstan.

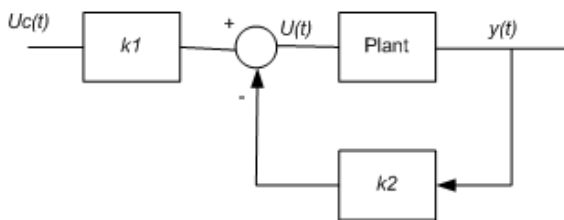
Berikut akan disajikan desain sistem kontrol adaptif sistem orde satu dengan menggunakan *MIT Rule*. Sistem proses ditunjukkan oleh persamaan diferensial :

$$\frac{dy}{dt} = -ay + bu \dots\dots\dots(7)$$

diamana u adalah variabel kontrol dan y adalah keluaran yang terukur. Diinginkan keluaran respon sistem sesuai dengan keluaran model sistem *loop* tertutup:

$$\frac{dy_m}{dt} = -a_m y_m + b_m u_c \dots\dots\dots(8)$$

pada perancangan ini digunakan kontroler dengan algoritma penempatan *Pole (Pole Placement)*. Pada algoritma ini terdapat dua parameter yang digunakan untuk mengatur besarnya sinyal kontrol keluaran dari kontroler yaitu k_1 dan k_2 . Algoritma penempatan *pole* ini secara blok diagram ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Blok diagram algoritma penempatan *pole*.

Persamaan kontroler selanjutnya dapat ditulis sebagai berikut:

$$u(t) = k_1 u_c(t) - k_2 y(t) \dots\dots\dots(9)$$

Jika kedua parameter tersebut memenuhi persamaan

$$k_1 = \frac{b_m}{b}$$

$$k_2 = \frac{a_m - a}{b} \dots\dots\dots(10)$$

maka hubungan masukan-keluaran sistem dan modelnya akan sama. *Error* merupakan selisih antara keluaran sistem *loop* tertutup (y) dengan keluaran model (y_m)

1) Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP
2) Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro UNDIP

$$e = y - y_m \dots\dots\dots(11)$$

dengan mensubstitusi persamaan (9) ke (7) didapat persamaan

$$y = \frac{bk_1}{p + a + bk_2} u_c$$

diamana $p=d/dt$ adalah operator diferensial. Turunan kepekaan (*sensitivity derivative*) didapatkan dengan melakukan turunan parsial pada *error* terhadap parameter k_1 dan parameter k_2 :

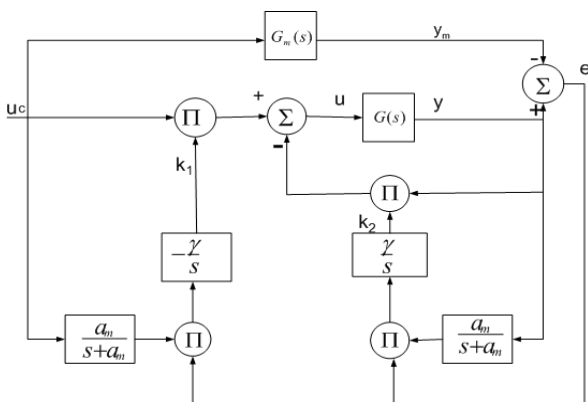
$$\frac{\partial e}{\partial k_1} = \frac{b}{p + a + bk_2} u_c$$

$$\frac{\partial e}{\partial k_2} = -\frac{b^2 k_1}{(p + a + bk_2)^2} = -\frac{b}{p + a + bk_2} y$$

formula ini belum dapat digunakan secara langsung karena parameter a dan b tidak diketahui, untuk itu diperlukan pendekatan atau perkiraan yang didasarkan pada pengamatan bahwa $p + a + bk_2 \approx p + a_m$ yang akan tercapai ketika parameter-parameter tepat pada harga yang sesuai. Dari persamaan (6) dan pendekatan ini, diperoleh persamaan *updating* parameter-parameter kontroler :

$$\frac{dk_1}{dt} = -\gamma \left(\frac{a_m}{p + a_m} u_c - e \right) \dots\dots\dots(12)$$

$$\frac{dk_2}{dt} = \gamma \left(\frac{a_m}{p + a_m} y \right) e \dots\dots\dots(13)$$



Gambar 4 Diagram blok MRAC orde satu dengan MIT Rule.

Skema pada Gambar 4 menunjukkan bahwa *error* dihasilkan dari selisih antara keluaran model referensi (y_m) dan keluaran proses (y). *Update* parameter kontroler k_2 dilakukan oleh hasil kali antara *error* (e), *gain* adaptasi (γ) dan keluaran proses (y) setelah melalui filter $\frac{a_m}{s + b_m}$, sedangkan parameter k_1 dilakukan *update* melalui hasil kali

error (e), *gain* adaptasi, dan referensi masukan (u_c) setelah melewati filter $\frac{a_m}{s + b_m}$.

2.2.2 Teori Kestabilan Lyapunov

Pada tahun 1892, A.M. Lyapunov menyajikan dua metode untuk menentukan kestabilan dinamik yang digambarkan oleh persamaan diferensial biasa. Dengan metode kedua dapat ditentukan kestabilan sebuah sistem tanpa menyelesaikan persamaan-persamaan keadaan. Dalam bagian ini akan lebih banyak dibahas metode kedua Lyapunov.

Untuk menganalisis metode kedua Lyapunov, Lyapunov memperkenalkan fungsi Lyapunov, suatu khayalan energi, yang disebut sebagai fungsi Lyapunov. Fungsi ini didasarkan pada x_1, x_2, \dots, x_n dan t . Fungsi Lyapunov dinyatakan dengan $V(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ atau lebih sederhana dengan $V(x, t)$. Jika fungsi Lyapunov tidak mencakup t secara jelas maka kita menyatakannya dengan $V(x_1, x_2, \dots, x_n)$ atau $V(x)$. Pada metode kedua Lyapunov perilaku tanda $V(x, t)$ dan bahwa turunan waktunya $V(x, t) = dV(x, t)/dt$ memungkinkan kita mendapatkan informasi tentang kestabilan (keadaan setimbang).

Diketahui sistem dinyatakan oleh persamaan :

$$\dot{x} = f(x, t) \dots\dots\dots(14)$$

dimana,

$$f(0, t) = 0 \text{ untuk semua } t$$

Jika fungsi saklar $V(x, t)$ yang mempunyai turunan parsial pertama kontinu dan memenuhi persyaratan berikut:

1. $V(x, t)$ definit positif
2. $\dot{V}(x, t)$ definit negatif

maka keadaan setimbang pada titik awal adalah stabil seragam secara garis lurus (*uniform asymptotic*).

Jika diberikan suatu sistem yang dinyatakan oleh:

$$\dot{x} = f(x, t)$$

dimana, $f(0, t) = 0$ untuk semua $t \geq t_0$

1) Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP
2) Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro UNDIP

Suatu fungsi saklar $V(x,t)$ yang mempunyai turunan parsial pertama kontinu dan memenuhi persyaratan berikut:

1. $V(x,t)$ definit positif
2. $\dot{V}(x,t)$ semi definit negatif
3. $\dot{V}(\phi(t;x_0,t_0),t)$ tidak menjadi nol pada $t \geq t_0$ untuk setiap t_0 dan setiap $x_0 \neq 0$, dimana $\phi(t;x_0,t_0)$ menyatakan trayektori atau solusi diawali dari x_0 dan t_0

maka keadaan kesetimbangan dititik awal dari sistem akan stabil seragam secara garis lurus.

Berikut akan disajikan desain sistem kontrol adaptif sistem orde satu dengan menggunakan teori kestabilan *Lyapunov*. Perancangan algoritma pengaturan parameter sistem adaptif dengan teori kestabilan *Lyapunov* didahului dengan melakukan penurunan persamaan diferensial dari *error*, $e = y - y_m$. Pada persamaan diferensial ini terdapat parameter-parameter yang dapat diatur. Kemudian hasil ini akan digunakan untuk mencari fungsi *Lyapunov* dan mekanisme adaptasi sistem yang akan membuat *error* menjadi nol.

Diinginkan respon sistem mengikuti model sistem seperti pada persamaan (8) dan persamaan sistem proses seperti ditunjukkan pada persamaan (7). Pada perancangan ini digunakan kontroler dengan algoritma penempatan *Pole (Pole Placement)*. Dimana blok diagramnya dapat dilihat pada Gambar 3. Persamaan kontroler sistem akan dihasilkan seperti pada persamaan (9). Dengan mensubstitusi persamaan (7) dan (9) diperoleh nilai parameter k_1 dan k_2 seperti ditunjukkan pada persamaan (10). *Error* sistem merupakan selisih antara keluaran sistem dengan keluaran model yang ditunjukkan oleh persamaan (11).

Untuk membuat *error* kecil, dilakukan penurunan persamaan *error*

$$\frac{de}{dt} = -a_m e - (bk_2 + a - a_m)y + (bk_1 - b_m)u_c \dots \dots \dots (15)$$

error akan menuju nilai nol ketika nilai parameter-parameternya sama seperti pada persamaan (10). Agar nilai parameter-parameter k_1 dan k_2 sesuai dengan harga yang diinginkan dilakukan perancangan mekanisme pengaturan parameter, diasumsikan $b\gamma > 0$ maka fungsi kuadratik *Lyapunov* didapatkan sebagai berikut:

$$V(e, k_1, k_2) = \frac{1}{2} \left(e^2 + \frac{1}{b\gamma} (bk_2 + a - a_m)^2 \right) + \frac{1}{b\gamma} (bk_1 - b_m)^2 \dots \dots \dots (16)$$

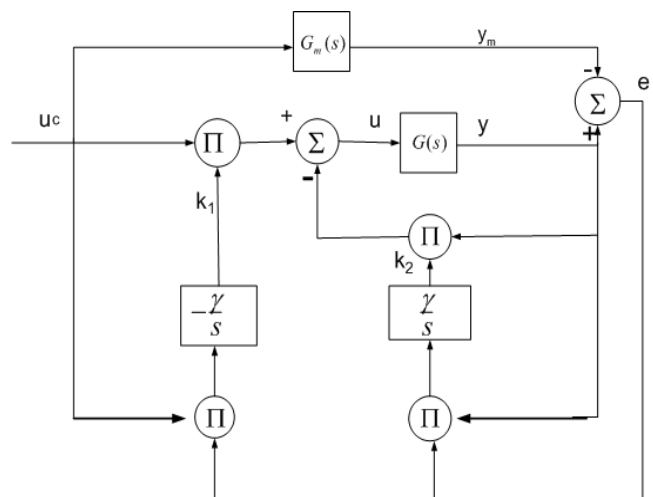
fungsi ini akan nol ketika nilai *error* nol dan parameter kontroler sesuai dengan harga yang diinginkan. Agar fungsi memenuhi kualifikasi sebagai fungsi *Lyapunov*, turunan dV/dt harus negatif.

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= e \frac{de}{dt} + \frac{1}{\gamma} (bk_2 + a - a_m) \frac{dk_2}{dt} + \frac{1}{\gamma} (bk_1 - b_m) \frac{dk_1}{dt} \\ &= -a_m e^2 + \frac{1}{\gamma} (bk_2 + a - a_m) \left(\frac{dk_2}{dt} - \gamma ye \right) \\ &\quad + \frac{1}{\gamma} (bk_1 - b_m) \left(\frac{dk_1}{dt} + \gamma u_c e \right) \dots \dots \dots (17) \end{aligned}$$

dari persamaan ini diperoleh persamaan untuk melakukan *update* parameter :

$$\frac{dk_1}{dt} = -\gamma u_c e \dots \dots \dots (18)$$

$$\frac{dk_2}{dt} = \gamma ye \dots \dots \dots (19)$$



Gambar 5 Diagram blok MRAC berdasar teori kestabilan *Lyapunov* untuk sistem orde satu

Berdasarkan diagram blok pada Gambar 5 *error* sistem diperoleh dari selisih antara keluaran sistem dengan keluaran model. Bersama sinyal

keluaran sistem, sinyal *error* digunakan meng-*update* parameter k_2 , sedangkan parameter k_1 di-*update* melalui sinyal *error* dan sinyal referensi. Parameter-parameter ini digunakan untuk menentukan sinyal kontrol sistem.

III. PERANCANGAN

3.1 Perancangan Kontroler Adaptif MRAC

Sebelum dilakukan perancangan *hardware* dan *software* terlebih dahulu dilakukan perancangan kontroler. Perancangan kontroler merupakan penentuan persamaan atau rumus mekanisme pengaturan untuk melakukan *update* terhadap parameter-parameter kontroler ketika terjadi perubahan karakteristik sistem maupun terjadi gangguan.

3.1.1 Metode Kestabilan Lyapunov

Langkah pertama adalah dengan menentukan model dari sistem sehingga sistem akan bekerja sesuai dengan karakteristik model yang ditentukan. Berdasarkan pemodelan secara matematis sistem adalah orde satu sehingga model yang digunakan adalah sistem orde satu sesuai persamaan (2). Fungsi alih orde satu model adalah :

$$G_m(s) = \frac{Y_m(s)}{U_c(s)} = \frac{b_m/a_m}{1/a_m \cdot s + 1} \dots\dots\dots(20)$$

nilai konstanta waktu model adalah $\tau = 1/a_m$. Agar tidak terjadi kesalahan keadaan tunak (*offset* sama dengan nol) maka harus dipenuhi kriteri nilai a_m sama dengan b_m . Sehingga dengan menentukan konstanta waktu model maka dapat ditentukan model dari sistem.

Persamaan model dalam bentuk *differential* dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{dy_m(t)}{dt(t)} = -a_m y_m(t) + b_m u_c(t) \dots\dots\dots(21)$$

jika dibawa kedalam bentuk *laplace* menjadi

$$s y_m(s) = -a_m y_m(s) + b_m u_c(s) \dots\dots\dots(22)$$

Persamaan (22) dengan metode *backward difference approximation* diubah kedalam persamaan diskrit menjadi :

$$y_m(k) = \left(\frac{1}{1 + a_m T} \right) y_m(k-1) + \left(\frac{b_m T}{1 + a_m T} \right) u_c(k) \dots\dots\dots(23)$$

Fungsi alih sistem proses ditunjukkan pada persamaan (24) berikut ini:

$$\theta(s) = \frac{1}{RCs + 1} \theta_i(s) \dots\dots\dots(24)$$

persamaan (24) dengan metode *backward difference approximation* diubah menjadi persamaan diskrit menjadi:

$$\theta(k) = \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{RC} \cdot T} \right) \theta(k-1) + \left(\frac{\frac{1}{RC} \cdot T}{1 + \frac{1}{RC} \cdot T} \right) \theta_i(k) \dots\dots\dots(25)$$

$\theta(k)$ merupakan keluaran sistem yang pada proses selanjutnya dinotasikan dalam $y(k)$, sedangkan $\theta_i(k)$ merupakan sinyal kontrol yang selanjutnya dinotasikan sebagai $u(k)$.

Sinyal kontrol ditentukan dari selisih antara keluaran sistem $y(k)$ dan keluaran model $y_m(k)$ yang telah ditentukan sebelumnya pada persamaan (11). Secara diskrit persamaan (11) dapat ditulis sebagai berikut:

$$e(k) = y(k) - y_m(k) \dots\dots\dots(26)$$

Sinyal kontrol ditentukan sesuai dengan persamaan (9) yang dalam bentuk diskrit dinyatakan $u(k) = k_1 u_c(k) - k_2 y(k) \dots\dots\dots(27)$

Penentuan mekanisme pengaturan atau *update* parameter nilai k_1 dan k_2 didasarkan pada persamaan (18) dan persamaan (19) yang diperoleh dari turunan fungsi Lyapunov. Persamaan (18) kemudian didiskritisasi dengan metode *backward difference approximation* menjadi

$$k_1(k) = k_1(k-1) - \gamma T u_c(k) e(k) \dots\dots\dots(28)$$

Persamaan (19) dengan cara yang sama didiskritisasi menjadi :

$$k_2(k) = k_2(k-1) + \gamma T y(k) e(k) \dots\dots\dots(29)$$

dimana T merupakan merupakan waktu sampling dan γ merupakan *gain* adaptasi. Perancangan ini menggunakan nilai *gain* adaptasi antara 0.001 sampai 0.01 sedang waktu sampling yang digunakan adalah 1 detik.

Nilai parameter-parameter ini (k_1 dan k_2) menentukan besarnya sinyal kontrol yang korelasinya didasarkan persamaan (27).

3.1.2 Metode MIT Rule

Secara umum perancangan sistem kontrol pendekatan *MIT Rule* dengan pendekatan kestabilan *Lyapunov* adalah sama, yang membedakan adalah pada mekanisme pengaturan parameter-parameter kontrolernya (*Adjustment mechanism*). Mekanisme pengaturan parameter-parameter kontroler pada *MIT*

Rule sesuai persamaan (12) dan persamaan (13). Kedua persamaan ini kemudian diubah ke dalam bentuk diskrit menjadi sebagai berikut:

$$k_1(k) = \left(\frac{2 + a_m T}{1 + a_m T} \right) k_1(k-1) - \left(\frac{1}{1 + a_m T} \right) k_1(k-2) - \left(\frac{\gamma a_m T^2}{1 + a_m T} \right) u_c(k) e(k) \dots \dots \dots (30)$$

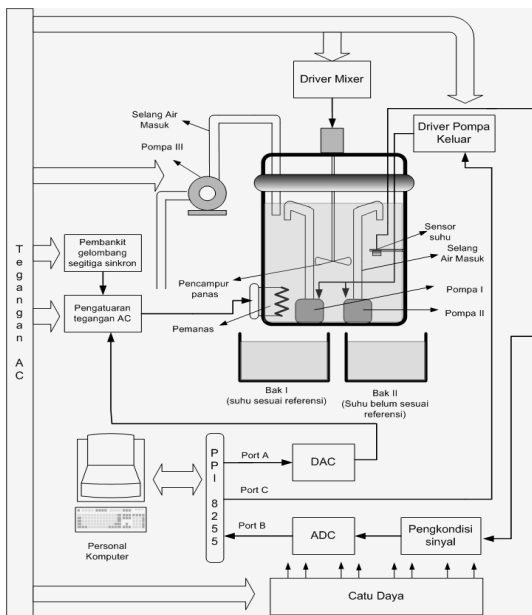
$$k_2(k) = \left(\frac{2 + a_m T}{1 + a_m T} \right) k_2(k-1) - \left(\frac{1}{1 + a_m T} \right) k_2(k-2) + \left(\frac{\gamma a_m T^2}{1 + a_m T} \right) y(k) e(k) \dots \dots \dots (31)$$

sehingga sinyal kontrol dapat ditentukan melalui persamaan (27).

3.2 Perancangan Hardware (Perangkat Keras)

Perangkat keras yang mendukung sistem pengatur suhu cairan ini antara lain komputer pribadi, PPI 8255, DAC 0808, ADC 0804, rangkaian pengkondisi sinyal, rangkaian driver pemanas, sensor suhu.

Gambaran secara umum perancangan sistem pengatur suhu cairan dapat dilihat pada Gambar 6. Penampung cairan digunakan toples terbuat dari plastik yang relatif tahan panas. Volume cairan dalam tabung sebanyak 9,37 liter, sedangkan debit air masuk dibuat sama dengan debit air keluar yaitu sebesar 18,52 mililitr tiap satu detik. Cairan dimasukkan kedalam penampung melalui selang plastik menggunakan pompa III.



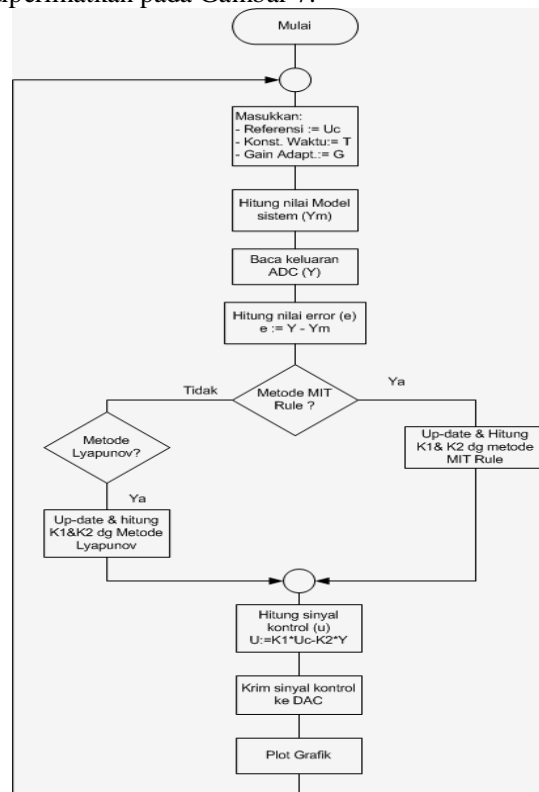
Gambar 6 Blok diagram perancangan perangkat keras sistem pengatur suhu cairan

Cairan dari dalam bak dikeluarkan menggunakan 2 pompa (pompa I dan pompa II). Kedua pompa ini mengeluarkan cairan dengan tujuan yang berbeda, pompa I mengeluarkan air ke bak I ketika kondisi suhu cairan sesuai dengan *set point* yang diinginkan. Pompa II mengeluarkan cairan ketika kondisi suhu cairan belum sesuai dengan *set point* yang diinginkan, pompa ini mengeluarkan cairan ke bak II. Pada bagian dalam bak penampung cairan diletakkan sensor suhu untuk mendeteksi besarnya suhu cairan dalam bak penampung, suhu inilah yang selanjutnya akan dikontrol.

Proses pemanasan cairan digunakan sebuah alat pemanas *heater*. Agar suhu cairan dapat merata dan seragam pada seluruh bagian cairan digunakan pengaduk yang digerakkan oleh motor DC. Komputer pribadi digunakan sebagai kontroler yang mengimplementasikan algoritma kontroler adaptif *MRAC* dan juga digunakan untuk menampilkan grafik dari respon sistem serta menyimpan data ke *file* untuk keperluan analisis.

3.3 Perancangan Perangkat Lunak (Software)

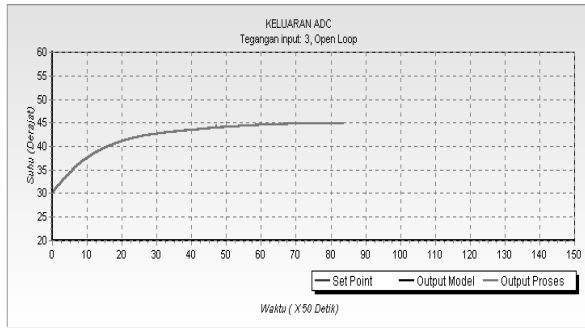
Perangkat lunak yang digunakan adalah bahasa pemrograman Borland Delphi versi 7.0. Perangkat lunak ini berfungsi untuk mengaplikasikan algoritma kontrol *MRAC* dan untuk memonitoring kondisi suhu *plant* yang dikontrol. Diagram alir program pengendalian diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 7 Flowchart pengendalian

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Hasil pengujian secara kalang terbuka diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Respon transien suhu air dengan pengujian kalang terbuka.

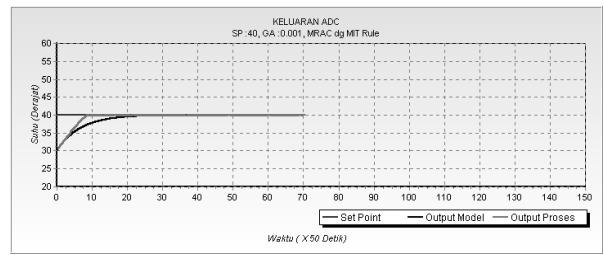
Pengujian secara kalang terbuka menunjukkan bahwa ketika DAC dikirim tegangan sebesar 3V maka suhu keluaran *plant* akan mencapai kondisi stabilnya pada suhu 44.97°C. Hasil data respon sistem secara kalang terbuka ini kemudian digunakan untuk menentukan konstanta waktu (τ) dari *plant*. Konstanta waktu (τ) dari *plant* merupakan besarnya waktu yang diperlukan oleh respon suhu keluaran *plant* untuk mencapai 63.2% dari suhu keluaran stabilnya. Perhitungan nilai konstanta waktu *plant* suhu cairan ini diperoleh sebesar $(0.632 \cdot (44.29 - 30.35)) + 30.35 = 39.59^\circ\text{C}$. Hasil akuisisi suhu *plant* menunjukkan bahwa untuk mencapai suhu 39.59°C dibutuhkan waktu sebesar 750 detik. Jadi sistem *plant* suhu cairan yang dikontrol memiliki konstanta waktu sebesar 750 detik.

4.1 Pengujian Sistem Kontrol Adaptif MRAC dengan mekanisme pengaturan MIT Rule.

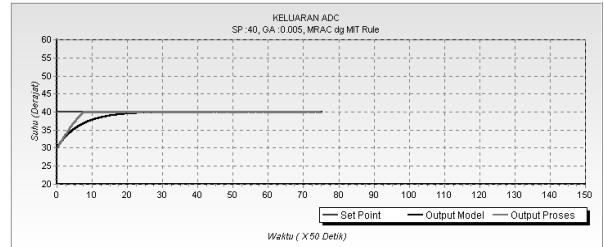
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh konstanta waktu model sistem dan besar *gain* adaptasi terhadap performansi respon suhu cairan. Pengujian ini menggunakan dua model dimana masing – masing memiliki konstanta waktu yang berbeda yaitu 300 detik dan 500 detik. Suhu referensi yang digunakan sebesar 40 °C. Setiap model dilakukan pengujian dengan tiga variasi *gain* adaptasi yang berbeda yaitu sebesar 0,001; 0,005 dan 0,01.

a. Model 1 dengan konstanta waktu 300 detik.

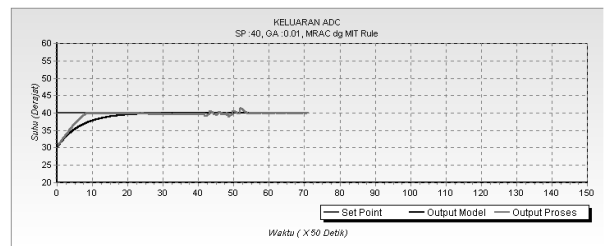
Grafik hasil respon sistem ketika digunakan model 1 dengan konstanta waktu model 300 detik ditunjukkan pada Gambar 9.



(a) Gain Adaptasi 0,001.



(b) Gain Adaptasi 0,005.

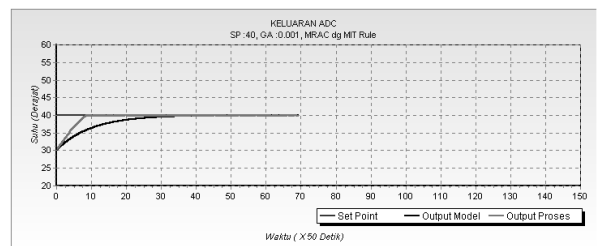


(c) Gain Adaptasi 0,01.

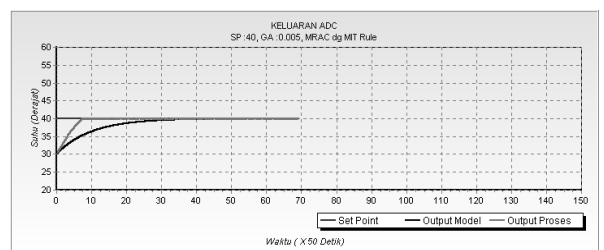
Gambar 9 Respon sistem MRAC metode MIT Rule pada referensi suhu 40 °C dengan konstanta waktu model 300 detik.

b. Model 2 dengan konstanta waktu 500 detik.

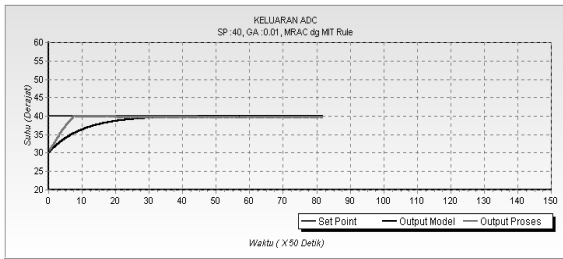
Hasil respon dengan konstanta waktu model 500 detik ditunjukkan pada Gambar 4.3.



(b) Gain Adaptasi 0,001.



(b) Gain Adaptasi 0,005.



(c) Gain Adaptasi 0,01

Gambar 10 Respon sistem MRAC metode MIT Rule pada referensi suhu 40 °C dengan konstanta waktu model 500 detik.

Berdasarkan grafik-grafik respon sistem hasil pengujian menunjukkan bahwa performansi respon proses dalam mengikuti respon model referensi sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai gain adaptasi dan nilai konstanta waktu model yang diberikan. Nilai gain adaptasi yang berbeda menghasilkan respon proses yang berbeda dalam mengikuti modelnya. Demikian pula nilai konstanta waktu model yang berbeda menghasilkan respon sistem yang berbeda pula.

Secara umum dapat dilihat bahwa respon proses cenderung lebih peka terhadap sinyal referensi (*set point*) daripada model referensinya ini dilihat dari grafik respon proses yang selalu lebih mendahului respon model referensinya. Namun kemampuan dalam mengikuti model referensinya tetap dipengaruhi oleh variasi nilai gain adaptasi dan konstanta waktu model referensinya.

Tabel 1 Data respon sistem untuk variasi gain adaptasi dan variasi konstanta waktu model referensi pada sistem kontrol MRAC metode MIT Rule.

Gain Adaptasi	Konstanta Waktu (Detik)			
	Model 1		Model 2	
	Model	Proses	Model	Proses
0.01	300	236	500	221
0.005	300	247	500	222
0.001	300	254	500	244

Tabel 1 menunjukkan data respon sistem untuk masing-masing konstanta waktu model dan variasi nilai gain adaptasi yang diberikan. Dari hasil pengujian menunjukkan respon proses dari sistem plant pengatur suhu air dengan kontroler adaptif MRAC metode MIT rule ini relatif baik bekerja pada rentang nilai gain adaptasi antara 0,001 sampai 0.005 artinya pada nilai gain adaptasi ini respon proses relatif dapat mengikuti model referensinya

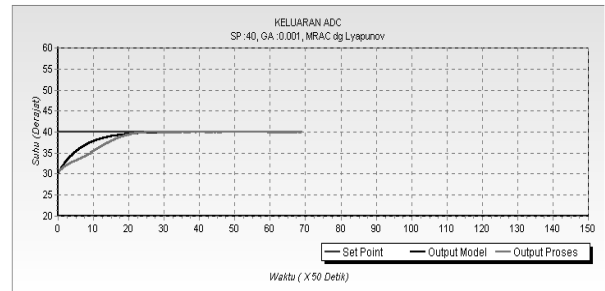
walaupun tidak bisa tepat sesuai dengan model referensinya.

4.2 Pengujian Sistem Kontrol Adaptif MRAC dengan mekanisme pengaturan Kestabilan Lyapunov.

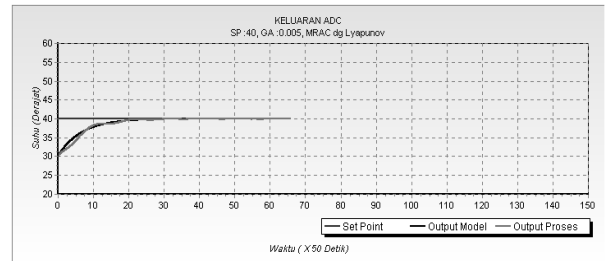
Hasil pengujian Sistem Kontrol Adaptif MRAC dengan mekanisme pengaturan Kestabilan Lyapunov. Ditunjukkan pada Gambar 11. dan Gambar 12.

a. Model 1 Dengan Konstanta Waktu 300 Detik.

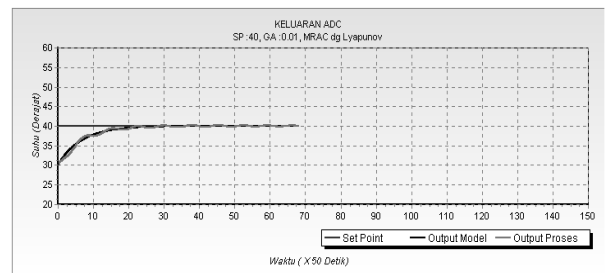
Hasil respon dengan konstanta waktu model 300 detik ditunjukkan pada Gambar 11.



(a) Gain Adaptasi 0,001.



(b) Gain Adaptasi 0,005.

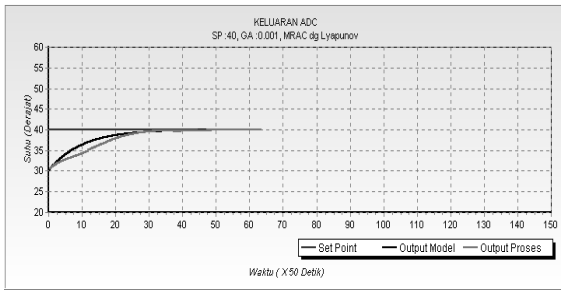


(c) Gain Adaptasi 0,01

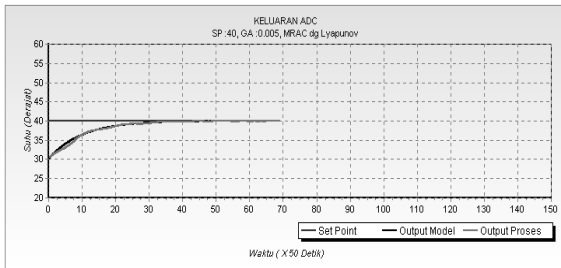
Gambar 11 Respon sistem MRAC metode Lyapunov pada referensi suhu 40 °C dengan konstanta waktu model 300 detik.

b. Model 1 Dengan Konstanta Waktu 500 Detik.

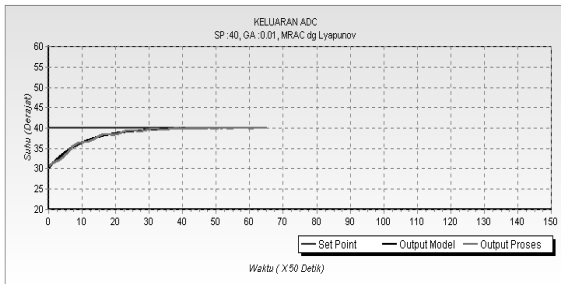
Hasil respon dengan konstanta waktu model 500 detik ditunjukkan pada Gambar 12.



(a) Gain Adaptasi 0,001.



(b) Gain Adaptasi 0,005.



(c) Gain Adaptasi 0,01.

Gambar 12 Respon sistem MRAC metode Lyapunov pada referensi suhu 40 °C dengan konstanta waktu model 500 detik.

Berdasarkan grafik-grafik respon sistem hasil pengujian menunjukkan bahwa performansi respon proses dalam mengikuti respon model sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai *gain* adaptasi dan nilai konstanta waktu model yang diberikan. Nilai *gain* adaptasi yang berbeda menghasilkan respon proses yang berbeda dalam mengikuti modelnya. Demikian pula nilai konstanta waktu model yang berbeda menghasilkan respon sistem yang berbeda.

Tabel 2 Data respon sistem untuk variasi *gain* adaptasi dan variasi konstanta waktu model referensi sistem kontrol MRAC metode Kestabilan Lyapunov.

Gain Adaptasi	Konstanta Waktu (Detik)			
	Model 1		Model 2	
	Model	Proses	Model	Proses
0.01	300	316	500	500
0.005	300	370	500	511
0.001	300	602	500	783

Dari hasil pengujian menunjukkan respon proses dari sistem *plant* pengatur suhu air ini optimal bekerja pada rentang nilai *gain* adaptasi antara 0,001 sampai 0,01 artinya pada nilai *gain* adaptasi ini respon proses dapat mengikuti model referensinya dengan baik. Grafik hasil pengujian juga menunjukkan pengaruh dari variasi nilai konstanta waktu model yang digunakan terhadap performansi respon proses sistem. Tabel 2 menunjukkan data respon sistem untuk masing-masing konstanta waktu model yang diberikan. Sistem *plant* pengatur suhu cairan ini merupakan sistem dengan respon lambat dengan nilai konstanta waktu secara *open loop* sebesar 750 detik. Dari data pada Tabel 2 menunjukkan nilai konstanta waktu model yang semakin mendekati nilai konstanta waktu *plant* (respon *open loop*) respon proses sistem akan semakin dapat mengikuti respon model referensinya. Ini disebabkan pada nilai konstanta waktu model yang mendekati model (besar) respon *transient* model referensinya relatif lebih lambat sehingga respon proses sistem semakin dapat mengikuti respon model referensinya.

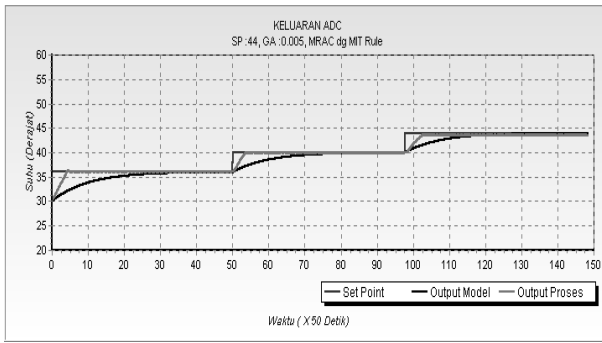
4.3 Perbandingan Unjuk Kerja Sistem Kontrol Adaptif MRAC Antara Metode MIT Rule Dan Metode Kestabilan Lyapunov.

Pada perbandingan unjuk kerja ini dilakukan pengujian pada kondisi nilai *gain* adaptasi dan konstanta waktu model yang sama.

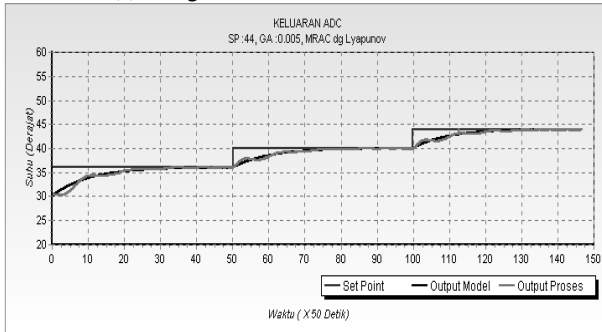
4.3.1 Unjuk kerja Referensi Naik

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan kemampuan sistem dari kedua metode antara *MIT Rule* dan kestabilan Lyapunov dalam mengikuti perubahan referensi yang berubah naik. Perubahan referensi yang digunakan adalah suhu 30 °C – 36 °C – 40 °C – 44 °C. Pengujian dilakukan pada nilai *gain* adaptasi 0.005 dan konstanta waktu model 500 detik.

Gambar 13 (a) menunjukkan bahwa pada sistem dengan kontrol adaptif MRAC metode *MIT Rule* respon proses cenderung lebih peka dalam mengikuti perubahan level suhu referensi yang diberikan, daripada terhadap model referensinya. Namun ketika diberikan suhu referensi yang relatif tinggi respon proses memiliki waktu penetapan yang relatif lama. Hal ini menunjukkan bahwa performansi respon proses pada metode *MIT Rule* sangat dipengaruhi oleh nilai level suhu referensi yang diberikan.



(a) Dengan MRAC metode *Mit Rule*.



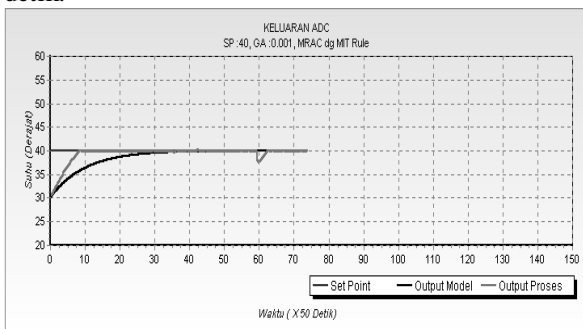
(b) Dengan MRAC metode Kestabilan *Lyapunov*.

Gambar 13 Perbandingan sistem MRAC antara *MIT Rule* dan Kestabilan *Lyapunov*.

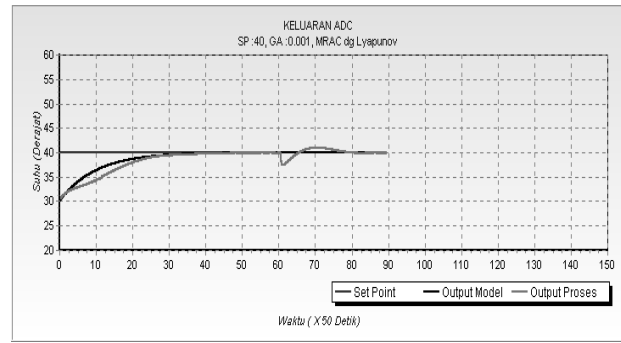
Gambar 13 (b) menunjukkan bahwa pada pemberian referensi awal respon proses sedikit tertinggal dari respon modelnya ini disebabkan karena pada kondisi ini parameter kontroler yang digunakan merupakan parameter awal yang belum diperbarui melalui proses pembelajaran adaptif. Namun secara umum respon proses metode kestabilan *Lyapunov* lebih baik dalam mengikuti perubahan model referensinya pada referensi yang berubah naik.

4.3.2 Unjuk Kerja Terhadap Adanya Gangguan

Pengujian unjuk kerja terhadap adanya gangguan kedua sistem diseting pada nilai *gain* adaptasi 0,001 dan konstanta waktu model 500 detik.



(a) Dengan MRAC metode *MIT Rule*.



(b) Dengan MRAC metode Kestabilan *Lyapunov*.

Gambar 14 Perbandingan sistem MRAC antara *MIT Rule* dan Kestabilan *Lyapunov*.

Tabel 3 Perbandingan unjuk kerja kontroler adaptif MRAC antara *MIT Rule* dan kestabilan *Lyapunov*.

Unjuk kerja	Kontroler Adaptif MRAC	
	<i>MIT Rule</i>	<i>Lyapunov</i>
Waktu mengatasi gangguan (detik)	155	894
Penurunan suhu maksimum (°C)	37.4	37.4

Gambar 14 menunjukkan hasil pengujian yang dilakukan pada kedua metode *MIT Rule* dan kestabilan *Lyapunov*. Kedua respon proses tampak mengalami penurunan ketika diberikan gangguan yang kemudian keduanya secara adaptif dapat kembali pada kondisi semula sesuai referensi. Namun kedua metode ini memiliki kemampuan yang berbeda dalam mengatasi gangguan. Data yang menunjukkan unjuk kerja dari kedua metode tersebut dapat dilihat pada Tabel 14.

Data pada Tabel 14 menunjukkan bahwa dalam mengatasi gangguan metode *MIT Rule* memiliki kemampuan yang lebih baik dibandingkan dengan metode kestabilan *Lyapunov*. Ini terlihat dengan metode *MIT Rule* waktu yang dibutuhkan untuk mengatasi gangguan lebih kecil dari pada dengan menggunakan metode kestabilan *Lyapunov*. Metode pengaturan dengan *MIT Rule* mempunyai waktu mengatasi gangguan sebesar 155 detik, sedangkan pada metode kestabilan *Lyapunov* sebesar 894 detik.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil percobaan yang dilakukan pada sistem kontrol adaptif dengan topologi kendali MRAC (*Model Reference Adaptive Controller*) dengan metode adaptasi yang berbeda yaitu *MIT Rule* dan metode *Lyapunov* pada *plant* pengatur suhu cairan didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Respon suhu keluaran sistem kontrol adaptif baik dengan metode *MIT Rule* maupun *Lyapunov* sangat tergantung pada pemilihan parameter-parameter sistem kontrol *MRAC* yaitu nilai *gain* adaptasi dan konstanta waktu model.
2. Pemilihan nilai *gain* adaptasi yang kecil pada kedua metode adaptasi baik *MIT Rule* maupun *Lyapunov* menghasilkan respon proses yang lambat dalam mengikuti model referensinya, sebaliknya nilai *gain* adaptasi yang besar menghasilkan respon sistem berhasil.
3. Respon proses pada sistem kontrol adaptif *MRAC* dengan metode adaptasi *MIT Rule* pada pengaturan *plant* suhu cairan dapat melakukan adaptasi parameter-parameter kontrolernya cukup baik pada nilai *gain* adaptasi dengan rentang 0,001 sampai 0,005, sedangkan dengan metode adaptasi *Lyapunov* cukup baik dalam mengadaptasi parameter-parameter kontrolernya pada nilai *gain* adaptasi dengan rentang nilai 0,001 sampai 0,01.
4. Metode adaptasi *Lyapunov* memiliki kemampuan mengikuti model referensi yang lebih baik terhadap perubahan referensi naik yang diberikan dari pada metode adaptasi *MIT Rule*.
5. Metode adaptasi *MIT Rule* memiliki kemampuan mengatasi gangguan lebih baik dari pada metode adaptasi *Lyapunov* yang dapat dilihat dari waktu yang dibutuhkan untuk mengatasi gangguan yang lebih singkat.

5.2 Saran

1. Metode kontrol dalam sistem kontrol adaptif *MRAC* dapat dikonfigurasi menggunakan metode kontrol yang lain seperti *PID* atau jaringan syaraf tiruan (*Neural Network*) untuk mendapatkan kinerja yang lebih baik.
2. Algoritma pengaturan parameter kontroler pada *MIT Rule* dapat dimodifikasi dengan menggunakan *MIT Rule* ternormalisasi sehingga performansi respon sistem dapat lebih baik.
3. *Plant* dapat dikembangkan dengan mengganti kran air dengan *valve* linear sehingga bukaan kran air masuk dan keluar dapat diatur secara adaptif pula.

DAFTAR PUSTAKA

- (1) Agus J Alam, M, *Pemrograman Database dan Server menggunakan Borland Delphi 2005*, Jakarta : PT Elek media Komputindo, 2005.
- (2) Astrom,K.J. and B. Wittenmark, *Adaptive Control*, Addison-wesley, Reading, MA, 1995.
- (3) Coughlin, Robert and Federick Driscoll, *Penguat Operasional dan Rangkaian Terpadu Linier*, Jakarta : Erlangga.
- (4) Kraft, Gordon, L and David, P, Campagna, *A Comparison Between CMAC Neural Network Control and Two Traditional Adaptive Control Systems*, IEEE Paper 3.13, 1990.
- (5) Malvino, *Prinsip-Prinsip Elektronika*, Jakarta : Erlangga, 1996.
- (6) Muhammad H Rashid, *Elektronika Daya : Rangkaian, Devais, dan Aplikasinya*, Jakarta : PT Prenhallindo, 1999.
- (7) Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Otomatik, Jilid 1*, Jakarta : Erlangga, 1995.
- (8) Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Otomatik, Jilid 2*, Erlangga, Jakarta, 1997.
- (9) Phillips and Charles L., *Digital Control System Analysis and Design*, Prentice Hall, Singapore, 1997.
- (10)<http://pdf.alldatasheet.com:80/datasheet-pdf/view/8866/NSC/LM35/datasheet.pdf>.

BIOGRAFI

Ferry Rusmawan (L2F000605)

Tercatat sebagai mahasiswa Teknik elektro Universitas Diponegoro Semarang. Saat ini sedang menyelesaikan studi S-1 pada jurusan yang sama dengan konsentrasi kontrol.

Email:

Ferry_Rusmawan@yahoo.com



Mengetahui/Mengesahkan,

Pembimbing I,

Pembimbing II,

**Wahyudi, ST. MT.
NIP. 132 086 662**

**Iwan Setiawan,ST.MT.
NIP. 132 283 183**