

Research Article

Aplikasi Kendali PID Menggunakan Skema *Gain Scheduling* Untuk Pengendalian Suhu Cairan pada *Plant Electric Water Heater*

Ahmad Shafi Mukhaitir¹, Iwan Setiawan², Sumardi²

1. Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang
2. Dosen Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang

Abstract

Metode PID gain scheduling adalah metode kendali dimana nilai parameter PID dijadwal berdasarkan titik kerja atau kondisi operasi yang dihadapi. Hal ini dimaksudkan agar respon sistem yang dihasilkan menjadi lebih baik pada daerah respon yang memiliki beban yang berbeda. Pada kasus ini gangguan yang diberikan berupa gangguan aliran inlet. Pengendalian menggunakan metode PID gain scheduling ini sebelumnya dilakukan pencarian parameter kontroler PID pada beban-beban tertentu dengan menggunakan metode Ziegler Nichols I. Setelah didapatkan parameter-parameter kontroler tersebut kemudian membagi daerah proses untuk variasi penjadwalan sistem (SV). Hal ini dimaksudkan agar saat terjadi gangguan berupa perubahan aliran inlet, sistem dapat langsung menanggapi dengan cepat. Dari hasil pengujian penggunaan metode Kendali gain scheduling dirasa sangat efektif dalam menangani gangguan. Metode kendali gain scheduling menghasilkan nilai ITAE sebesar 141051 yang lebih kecil dibandingkan sistem yang menggunakan kendali PID single dengan nilai ITAE 174067 dan 187569. Analisis indeks performansi kesalahan ITAE digunakan untuk menentukan unjuk kerja sistem yang terbaik dengan menghitung nilai integral dari error yang didapatkan saat pengujian.

Keyword : PID (Proporsional-Integral-Derivative), Gain Scheduling, Mikrokontroler ATmega32, Integral of Time Absolut Error (ITAE).

I. PENDAHULUAN

Metode PID *Gain scheduling* adalah metode kendali dimana nilai parameter PID dijadwal berdasarkan titik kerja atau kondisi operasi yang dihadapi. Hal ini dimaksudkan agar respon sistem yang dihasilkan menjadi lebih baik pada daerah respon yang memiliki beban yang berbeda.

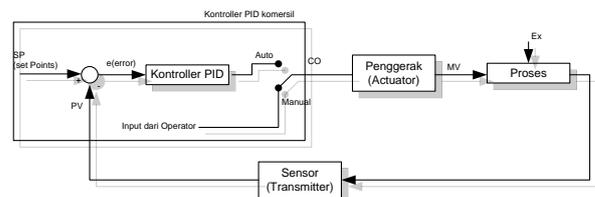
Untuk pengimplementasian metode kendali *gain scheduling*, pada penelitian ini dirancang sebuah sistem pengendalian suhu yang dapat mengetahui jumlah perubahan aliran air yang masuk pada *electric water heater*. *Water heater* adalah sebuah tangki cairan yang di dalamnya terdapat *heater* (pemanas listrik) dan sensor suhu yang digunakan untuk membaca suhu cairan yang berada didalam tangki. Sedangkan untuk mendapatkan beban yang berbeda, diberi gangguan yaitu dengan mengatur jumlah aliran air yang masuk pada tangki *water heater*. Kondisi ini mengakibatkan perubahan nilai suhu yang tidak sesuai dengan yang diharapkan sehingga proses pengendalian suhu menjadi tidak stabil.

II. DASAR TEORI

2.1 Model *Self Regulating Process*

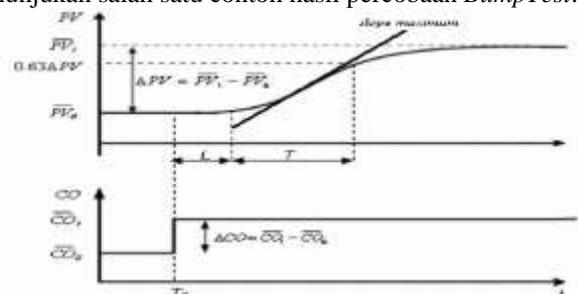
Model *self regulating process* pada dasarnya dapat didekati oleh sebuah model matematis FOPDT (*First Order Plus Ded Time*) yang hanya dicirikan oleh tiga buah parameter yaitu *Process transport delay* – L, *Process time constant* – T, *Process static gain*- K

Ketiga parameter yang menggambarkan dinamika proses, secara praktis dapat diperoleh atau diidentifikasi melalui eksperimen sederhana *BumpTest* atau sinyal tangga secara *open loop* pada mode kontrol manual (lihat Gambar 1).



Gambar 1 Percobaan *BumpTest* pada kontrol manual^[10]

Secara teknis percobaan *BumpTest* dilakukan dengan cara memberi perubahan tangga (step) sinyal output kontroler (CO) oleh operator pada saat proses mengalami keadaan *steady* (stabil) disekitar titik kerja nominalnya. Gambar 2 menunjukkan salah satu contoh hasil percobaan *BumpTest*.



Gambar 2 Respon Tangga percobaan *BumpTest* untuk model FOPDT^[10]

Gambar 2 diatas merupakan grafik respon tangga percobaan *BumpTest* yang mana parameter-parameter proses FOPDT (*First Order Plus Ded Time*) dapat dicari sebagai berikut:

- Keterlambatan transportasi proses (L) = waktu yang terjadi pada proses yang dihitung sejak terjadi perubahan tangga pada CO sampai variabel proses (PV) yang dikontrol mulai menanggapi perubahan input CO.

- b. Konstanta waktu (T) = Waktu yang di perlukan sehingga nilai PV mencapai kurang lebih 63 % dari keadaan steady akhir setelah waktu tunda.
- c. Gain Statis Proses (K) = Perbandingan perubahan PV terhadap perubahan CO dalam keadaan steadynya. Gain statis bisa bernilai positif maupun negatif tergantung jenis control valve yang di gunakan.

$$K = \frac{PVP_1P_0}{KCO_1C}$$

2.2 Pengendali PID (Proporsional-Integral-Derivative)

Pengendali PID adalah suatu sistem pengendali yang merupakan gabungan antara pengendali proporsional, integral, dan turunan (*derivative*). Dalam waktu kontinyu, sinyal keluaran pengendali PID dapat dirumuskan sebagai berikut.^[7]

$$u(t) = Kp \left(e(t) + \frac{1}{Ti} \int e(t) dt + Td \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

atau

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \int e(t) dt + Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

dengan

$u(t)$ = sinyal keluaran pengendali PID

Kp = konstanta proporsional

Ti = waktu integral

Td = waktu turunan

Ki = konstanta integral

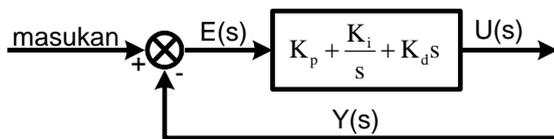
Kd = konstanta turunan

$e(t)$ = sinyal kesalahan

Jadi, fungsi alih pengendali PID (dalam domain s) dapat dinyatakan sebagai berikut.^[7]

$$Gc(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + Kds \quad (3)$$

Diagram blok pengendali PID dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram blok pengendali PID.^[7]

Sedangkan dalam kawasan sistem diskret, pengendali PID dapat dituliskan dalam bentuk persamaan beda sebagai berikut.^[7]

$$u(k) = Kp \cdot e(k) + Ki \cdot T \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + Kd \frac{(e(k) - e(k-1))}{T}$$

2.3 Penalaan Pengendali PID Metode ke-1 Ziegler-Nichols

Metode ke-1 didasarkan pada respon *plant* terhadap masukan tangga (*step*) dalam kalang terbuka. *Plant* yang tidak mempunyai *integrator*, akan menghasilkan kurva tanggapan terhadap masukan tangga, seperti halnya pada hasil respon uji *Bumptest* yang diperlihatkan pada gambar 2.

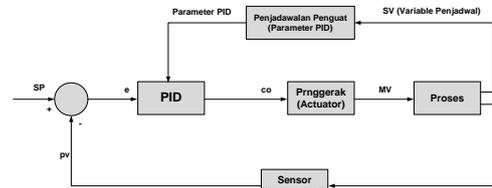
Rumus-rumus untuk mencari parameter pengendali menggunakan metode kurva reaksi ditabelkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Rumus parameter PID dengan penalaan Ziegler-Nichols metode ke-1.

Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	T/LK	-	-
PI	$0.9T/KL$	$3,33L$	-
PID	$1,2T/KL$	$2L$	$0,5L$

2.4 Gain scheduling

Gain scheduling adalah sebuah metode kendali dimana besar parameter PID yang digunakan oleh modul kendali dijadwal berdasarkan titik kerja atau kondisi operasi yang dihadapi. Agar setiap saat kontroler mengetahui kondisi proses, maka dalam skema kendali ini diperlukan pengukuran variabel tambahan (*auxillaries variable*) yang secara teknis digunakan sebagai variabel penjadwal-*scheduled variable*. Diagram blok sistem kendali *Gain Scheduling* ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4 Diagram blok sistem kendali *Gain Scheduling*.^[10]

Dalam perancangan awal, kita terlebih dahulu harus menentukan jangkauan nilai variabel penjadwal (*SV*) untuk setiap kondisi dinamika proses yang sedang dihadapi. Tabel 2 memperlihatkan salah satu contoh rancangan tabel penguat.

Tabel 2 Tiga himpunan parameter PID untuk tiga kondisi proses.^[10]

	K_p	T_i	T_D
Kondisi 1: $SV_1 < SV < SV_2$	K_{P1}	T_{i1}	T_{D1}
Kondisi 2: $SV_2 < SV < SV_3$	K_{P2}	T_{i2}	T_{D2}
Kondisi 3: $SV > SV_3$	K_{P3}	T_{i3}	T_{D3}

2.5 Integral of Time Absolute Error (ITAE)

Kriteria ITAE merupakan suatu kriteria indeks performansi dimana nilai indeks performansinya didasarkan pada hasil integral waktu dan harga mutlak dari error. Kriteria ini dapat dirumuskan berdasarkan persamaan 4.^[7]

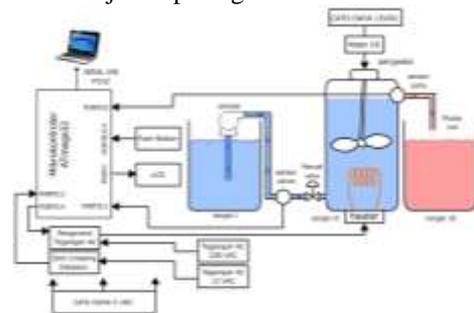
$$\int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (4)$$

Pada kriteria ini kesalahan awal yang besar pada respon tangga satuan (*step*) mendapatkan bobot yang rendah, sedangkan kesalahan yang terjadi setelah respon transien memiliki bobot yang tinggi.

III. PERANCANGAN

3.1 Perancangan Perangkat Keras (Hardware)

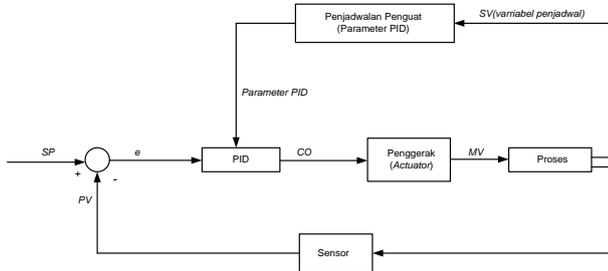
Perancangan perangkat keras sistem pengendali suhu cairan ini terdiri dari mikrokontroler AVR ATmega32, sensor suhu LM35, *Keypad*, LCD, kendali tegangan AC sebagai pengaturan tegangan input *heater*, *heater* sebagai aktuator, *push button* sebagai unit masukan dan LCD sebagai perancangan *display*. Secara umum perancangan perangkat keras sistem ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8 Rancangan *hardware plant* pengendali suhu cairan.

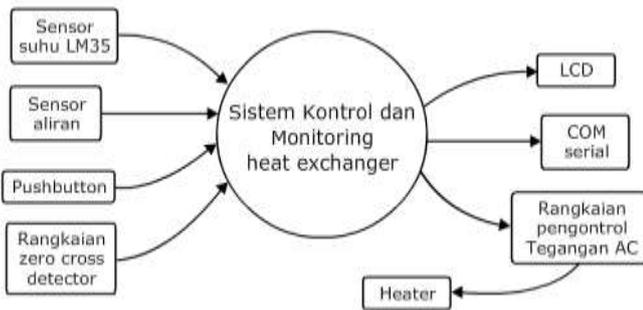
3.2 Perancangan perangkat Lunak (Software)

Sistem kontrol pengendalian suhu cairan pada Penelitian ini menggunakan kendali logika *Gain Scheduling*. Pada logika kendali *Gain Scheduling* ini besarnya nilai parameter PID (*Propositional – Integral – Derivative*) di bedakan jumlah aliran yang masuk pada tangki *water heater*. Pada Gambar 9 merupakan diagram blok logika *Gain Scheduling* yang digunakan pada Penelitian ini.



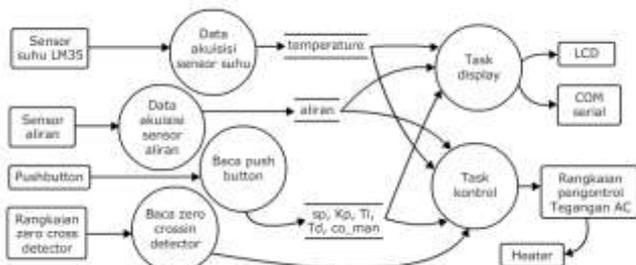
Gambar 9 Logika *Gain Scheduling* pada sistem kendali suhu cairan.

Pada perancangan perangkat lunak sistem pengendalian suhu ini menggunakan pendekatan diagram fungsional.



Gambar 10 Gambar diagram fungsional level 0

Setelah menggambar diagram fungsional level 0, langkah selanjutnya adalah mendetailkan diagram fungsional dengan menambahkan fungsi-fungsi dan tingkah laku dari pengendali suhu. Adapun diagram fungsional level 1 adalah sebagai berikut.



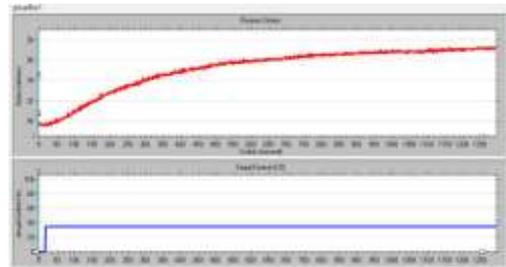
Gambar 11 Gambar diagram fungsional level 1

3.3 Penalaan Pengendali PID (*Propositional – Integral – Derivative*)

Pada Penelitian ini, Penalaan pengendali PID dilakukan pada dua variasi debit aliran *inlet*, yaitu pada aliran 12ml/s dan 35ml/s.

3.3.1 Penalaan Pengendali PID pada aliran inlet 12ml/s

Penalaan parameter PID dilakukan dengan memberi sinyal kontrol (u(t)) sebesar 35% pada suhu awal cairan sebesar 29°C. Untuk hasilnya dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12 Penalaan pengendali PID pada aliran 12ml/s

Dari Gambar 12, dapat dihitung nilai parameter proses sebagai berikut.

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta CO} = \frac{PV_1 - PV_0}{CO_1 - CO_0} = \frac{37 - 29,5}{35 - 0} = 0,214$$

$$L = 45 - 15 = 30 \text{sekon}$$

$$T = 63\% \Delta PV$$

$$= 63\% \times 7,5$$

$$= 4,73 + 29,5 = 34,2$$

$$T \text{ pada suhu } 34,2^\circ\text{C} = 307 - 50 = 257 \text{detik}$$

Dari nilai-nilai yang sudah diketahui dapat diperoleh persamaan matematis fungsi alih sistem.

$$H(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-sL}$$

$$H(s) = \frac{0,214}{257s + 1} e^{-30s}$$

Dari persamaan fungsi alih di atas dapat dicari parameter PID menggunakan metode Ziegler – Nichols berdasarkan persamaan pada Tabel 1, sehingga didapatkan parameter kendali PID sebagai berikut.

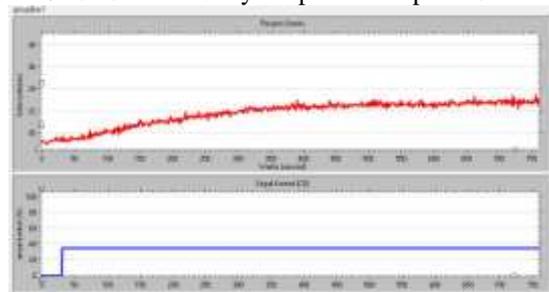
$$Kp = \frac{1,2T}{KL} = 48$$

$$Ti = \frac{2L}{60} = 60$$

$$Td = \frac{0,5L}{15} = 15$$

3.3.2 Penalaan Pengendali PID pada aliran inlet 35ml/s

Penalaan parameter PID dilakukan dengan memberi sinyal kontrol (u(t)) sebesar 35% pada suhu awal cairan sebesar 29°C. Untuk hasilnya dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13 Penalaan pengendali PID pada aliran 35ml/s

Dari Gambar 13, dapat dihitung nilai parameter proses sebagai berikut.

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta CO} = \frac{PV_1 - PV_0}{CO_1 - CO_0} = \frac{33 - 29,2}{35 - 0} = 0,108$$

$$L = 60 - 32 = 28s$$

$$T = 63\% \Delta PV$$

$$= 63\% \times 3,8$$

$$= 2,394 + 29,2 = 31,59$$

$$T \text{ suhu } 31,6^\circ\text{C} = 220 - 60 = 160 \text{ s}$$

Dari nilai-nilai yang sudah diketahui dapat diperoleh persamaan matematis fungsi alih sistem.

$$H(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-sL}$$

$$H(s) = \frac{0,108}{160s + 1} e^{-28s}$$

Dari persamaan fungsi alih di atas dapat dicari parameter PID menggunakan metode Ziegler – Nichols berdasarkan persamaan pada Tabel 1, sehingga didapatkan parameter kendali PID sebagai berikut.

$$Kp = \frac{1,2T}{KL} = 63,2 \quad Ti = \frac{2L}{56} = 56 \quad Td = \frac{0,5L}{14} = 14$$

IV. PENGUJIAN dan ANALISIS

4.1 Pengujian Sensor LM35

Pengujian sensor ini dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor LM35 dengan termometer. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Perbandingan suhu pembacaan termometer dengan pembacaan sensor LM35.

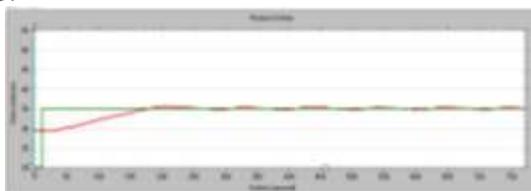
No	Suhu terukur (°C)	Sensor LM35 (°C)
1	30	29.9
2	35	35.2
3	37	36.9
4	41	40.7
5	45	45.3
6	47	47.2
7	54	53.9
8	57	56.8

4.2 Pengujian Sistem

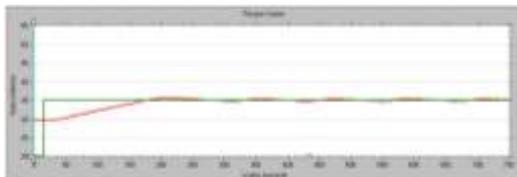
Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan dua nilai parameter PID untuk tiap aliran yang telah ditentukan sehingga didapatkan grafik respon sistemnya.

4.2.1 Pengujian Sistem pada Aliran 12ml/s

Pengujian dilakukan dengan variasi parameter PID pada aliran inlet 12ml/s seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14 dan 15.



Gambar 14 Respon sistem dengan parameter PID I



Gambar 15 Respon sistem dengan parameter PID II

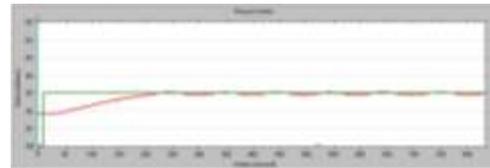
Tabel 4 Perbandingan respon sistem pada aliran inlet 12ml/s.

Parameter PID	Set Point (°C)	Suhu awal (°C)	tr (s)	Mp (%)	ts (s)	ITAE
Kp : 48 Ti : 60 Td : 15	35	29,7	147	0,017	254	77717
Kp : 63,2 Ti : 56 Td : 14	35	29,7	144	0,02	268	79973

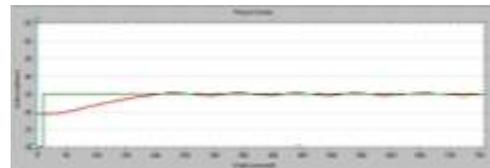
Pada Tabel 4 diketahui hasil respon sistem untuk pengujian dengan variasi parameter PID dengan debit aliran inlet sebesar 12ml/s. Pada parameter PID I diperoleh waktu naik (tr) sebesar 147 detik, lewatan maksimum (Mp) 0,017% dan waktu penetapan (ts) sebesar 254 detik. Hal ini menunjukkan respon sistem menuju pada keadaan steady cukup cepat. Pada parameter PID II diperoleh waktu naik (tr) sebesar 144 detik, lewatan maksimum (Mp) 0,02% dan waktu penetapan (ts) sebesar 268 detik. Pada parameter ini diperoleh waktu naik yang lebih cepat dikarenakan nilai parameter yang besar akan tetapi menghasilkan overshoot yang lebih besar pula dan waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan steady juga semakin lama. Dari kedua pengujian diatas dapat disimpulkan bahwa pada aliran inlet yang kecil respon sistem akan lebih baik jika menggunakan parameter kontroler yang kecil pula hal ini dapat dilihat dari indeks performansi kesalahan ITAE untuk parameter PID I menghasilkan angka yang lebih kecil dari parameter PID II.

4.1.1 Pengujian Sistem pada Aliran 35ml/s

Pengujian dilakukan dengan variasi parameter PID pada aliran inlet 35ml/s seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16 dan 17.



Gambar 16 Respon sistem dengan parameter PID I



Gambar 17 Respon sistem dengan parameter PID II

Tabel 5 Perbandingan respon sistem pada aliran inlet 35ml/s.

Parameter PID	Set Point (°C)	Suhu awal (°C)	tr (s)	Mp (%)	ts (s)	ITAE
Kp : 48 Ti : 60 Td : 15	35	29,3	181	0,011	317	97150
Kp : 63,2 Ti : 56 Td : 14	35	29,4	168	0,011	305	95202

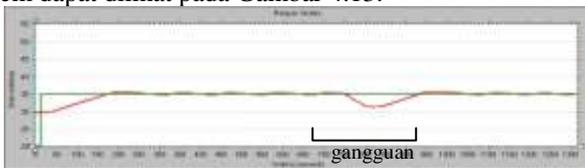
Pada Tabel 5 diketahui hasil respon sistem untuk pengujian dengan variasi parameter PID dengan debit aliran inlet sebesar 30ml/s. Pada parameter PID I diperoleh waktu naik (tr) sebesar 181 detik, lewatan maksimum (Mp) 0,011% dan waktu penetapan (ts) sebesar 317 detik. Hal ini menunjukkan respon sistem menuju pada keadaan steady cukup lama. Pada parameter PID II diperoleh waktu naik (tr) sebesar 168 detik, lewatan maksimum (Mp) 0,011% dan waktu penetapan (ts) sebesar 305 detik. Pada parameter ini diperoleh waktu naik yang lebih cepat dikarenakan nilai parameter yang besar, overshoot yang dihasilkan juga tidak besar. Dengan kata lain nilai parameter kontroler ini sangat cocok digunakan pada kasus aliran inlet yang besar. Hal ini juga terlihat dari waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan steady juga lebih cepat dan nilai dari indeks performansi kesalahan ITAE yang lebih kecil jika dibandingkan dengan waktu penetapan menggunakan parameter PID I.

4.2 Pengujian dengan Gangguan

Daya tahan sistem terhadap gangguan dan kecepatan respon sistem untuk kembali ke referensi sebelum gangguan, dapat diketahui dengan melakukan beberapa pengujian yaitu pertama dengan memberikan gangguan berupa es batu pada tangki *water heater*, kedua memberikan gangguan berupa perubahan aliran pada bagian *inlet* dengan mengatur pembukaan *valve*. Pemberian gangguan ini dilakukan pada sistem yang telah mencapai kestabilan pada suatu nilai referensi. Referensi suhu yang digunakan yaitu 35°C dengan suhu awal ±29,5°C.

4.2.1 Pengujian dengan Gangguan berupa Es Batu

Pengujian ini dilakukan dengan menambahkan es batu sebesar 250 gram pada saat sistem telah mencapai pada keadaan *steady*. Aliran inlet yang digunakan pada pengujian sebesar 10ml/s dengan suhu awal ±29,5°C. Hasil respon sistem dapat dilihat pada Gambar 4.13.



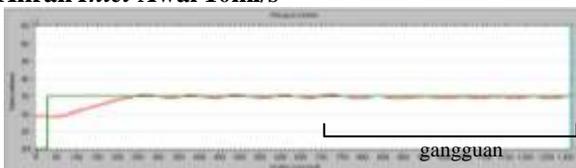
Gambar 18 Respon sistem dengan pemberian gangguan berupa es batu sebesar 250 gram

Gambar 18 menunjukkan respon sistem pengendalian suhu dengan pemberian gangguan berupa es batu pada detik ke 750. Seperti yang terlihat pada gambar setelah pemberian es batu sistem mengalami penurunan suhu sampai dengan 31,4°C. Sistem ini dapat dikatakan memiliki performansi yang baik, pemberian gangguan ini dapat ditangani dengan cepat sehingga sistem kembali pada keadaan *steady* pada detik ke 950.

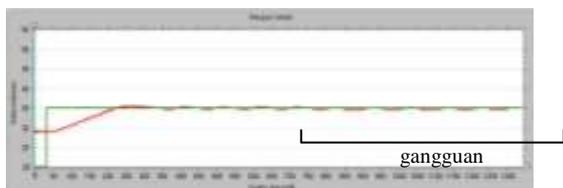
4.2.2 Pengujian dengan Gangguan Aliran Inlet

Pengujian dengan gangguan berupa aliran *inlet* ini dimaksudkan untuk melihat respon atau performansi dari sistem yang diujikan dengan variasi ketiga parameter kontroler, yaitu parameter PID I, PID II dan *gain scheduling*. Gangguan aliran *inlet* ini dilakukan dengan 2 pengujian yaitu dengan aliran awal sebesar 10ml/s kemudian diubah menjadi 30ml/s dan dengan aliran awal 30ml/s kemudian diubah menjadi 10ml/s.

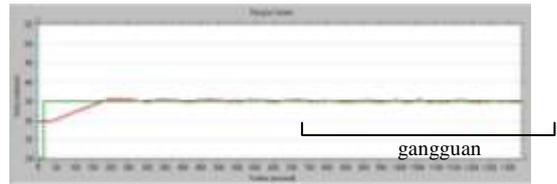
• Aliran Inlet Awal 10ml/s



Gambar 19 Respon sistem parameter PID I dengan pemberian gangguan aliran inlet 30ml/s



Gambar 20 Respon sistem parameter PID II dengan pemberian gangguan aliran inlet 30ml/s



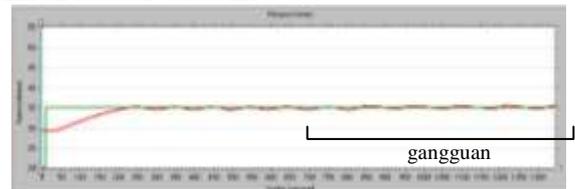
Gambar 21 Respon sistem *gain scheduling* dengan pemberian gangguan aliran inlet 30ml/s

Tabel 6 Perbandingan respon sistem pada referensi tetap dengan gangguan aliran inlet.

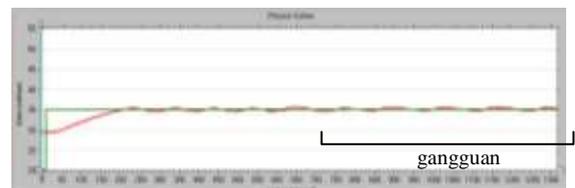
Parameter PID	Set Point (°C)	Suhu awal (°C)	Aliran		ITAE
			Awal (ml/s)	Akhir (ml/s)	
Kp : 48 Ti : 60 Td : 15	35	29,7	10	30	174067
Kp : 63,2 Ti : 56 Td : 14	35	29,7	10	31	187659
<i>Gain Scheduling</i>	35	29,6	11	30	141051

Dari Tabel 6 diketahui respon sistem terhadap gangguan berupa perubahan aliran *inlet* dengan mengatur bukaan *valve*. Pada PID I penurunan suhu sebesar 0,4°C dari keadaan *steady*, sistem mengalami kesulitan untuk mempertahankan suhu sesuai dengan referensi. Pada PID II terjadi penurunan suhu sebesar 0,3°C dari keadaan *steady*, dengan parameter kontroler yang besar sistem tidak mengalami kesulitan untuk mencapai keadaan *steady*. Pada pengujian menggunakan skema kendali *gain scheduling*, penurunan suhu yang terjadi lebih kecil dibandingkan kendali PID *single* yaitu sebesar 0,2°C dari keadaan *steady*. Pengujian dengan gangguan ini menunjukkan penggunaan skema kendali *gain scheduling* lebih efektif dalam menanggapi gangguan yang diberikan pada sistem, yaitu dapat terlihat pada analisis indeks performansi kesalahan ITAE yang menghasilkan angka yang kecil.

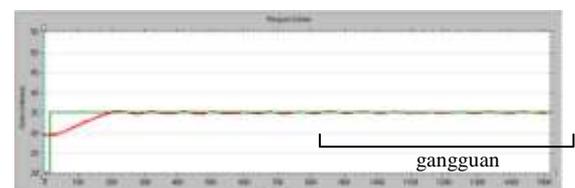
• Aliran Inlet Awal 30ml/s



Gambar 22 Respon sistem parameter PID I dengan pemberian gangguan aliran inlet 10ml/s



Gambar 23 Respon sistem parameter PID II dengan pemberian gangguan aliran inlet 10ml/s



Gambar 24 Respon sistem *gain scheduling* dengan pemberian gangguan aliran inlet 10ml/s

Tabel 7 Perbandingan respon sistem pada referensi tetap dengan gangguan aliran *inlet*.

Parameter PID	Set point (°C)	Suhu awal (°C)	Aliran		ITAE
			Awal (ml/s)	Akhir (ml/s)	
Kp : 48 Ti : 60 Td : 15	35	29,7	30	10	234388
Kp : 63,2 Ti : 56 Td : 14	35	29,7	30	12	231820
<i>Gain Scheduling</i>	35	29,6	31	10	133335

Dari Tabel 7 diketahui respon sistem terhadap gangguan berupa perubahan aliran *inlet* dengan mengatur bukaan *valve*. Pada parameter PID I kenaikan suhu sebesar 0,6°C dari keadaan *steady*, sistem tidak mengalami kesulitan untuk mempertahankan suhu sesuai dengan referensi. Pada parameter PID II terjadi kenaikan suhu sebesar 0,6°C dari keadaan *steady*, dengan parameter kontroler yang besar pada aliran inlet yang kecil mengakibatkan sistem menjadi tidak stabil. Sistem mengalami osilasi secara terus-menerus diatas nilai referensi. Pada pengujian menggunakan skema kendali *gain scheduling*, kenaikan suhu yang terjadi lebih kecil dibandingkan menggunakan kontrol PID *single* yaitu 0,4°C serta sistem tidak mengalami osilasi. Pengujian dengan gangguan ini menunjukkan penggunaan skema kendali *gain scheduling* lebih efektif dalam menanggapi gangguan yang diberikan pada sistem, yaitu dapat terlihat pada analisis indeks performansi kesalahan ITAE yang menghasilkan angka yang kecil.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang dilakukan pada sistem pengendalian suhu, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada pengujian PID *single* untuk aliran *inlet* 12ml/s, parameter PID I diperoleh nilai ITAE sebesar 77717 sedangkan parameter PID II nilai ITAE sebesar 79973. Pengujian ini menunjukkan pada aliran *inlet* yang kecil parameter PID I memiliki respon/unjuk kerja yang lebih baik. Hal ini disebabkan pada aliran *inlet* kecil proses pemanasan akan lebih cepat sehingga tidak memerlukan parameter PID yang besar.
2. Pada pengujian PID *single* untuk aliran *inlet* 30ml/s, parameter PID I diperoleh nilai ITAE sebesar 97150, sedangkan parameter PID II nilai ITAE sebesar 95202. Pengujian ini menunjukkan pada aliran *inlet* yang besar parameter PID II memiliki respon/unjuk kerja yang lebih baik. Hal ini disebabkan pada aliran *inlet* besar mengakibatkan proses pemanasan menjadi semakin lama sehingga apabila sinyal kontrol yang dihasilkan sistem terlalu kecil maka sistem akan mengalami *offset* yang cukup besar.
3. Pada pengujian variasi parameter PID, menunjukkan nilai kontroler yang besar akan memberikan unjuk kerja yang baik jika aliran *inlet* yang diberikan besar begitu pula sebaliknya.
4. Pengujian dengan gangguan berupa es batu sebesar 250 gram, sistem dapat menangani gangguan dengan cepat. Hal ini dapat dilihat pada penurunan suhu yang dialami sistem sebesar 3,6°C dan waktu pemulihan yang diperlukan oleh sistem selama 100 detik.

5. Pada pengujian perbandingan respon sistem antara metode PID *single* dan *Gain Scheduling* menunjukkan metode *Gain Scheduling* menghasilkan nilai ITAE sebesar 141051 yang lebih baik dibandingkan PID *single* biasa dengan nilai ITAE untuk parameter PID I 174067 dan parameter PID II sebesar 187569.

5.2 Saran

Untuk pengembangan sistem lebih lanjut, maka dapat diberikan saran-saran sebagai berikut:

1. Sebaiknya menggunakan sensor aliran lebih handal dan memiliki keakuratan yang tinggi.
2. Penggunaan heater sebaiknya menggunakan daya yang lebih besar misalnya 3000watt, sehingga dalam penentuan referensi bisa lebih tinggi dan respon sistem yang didapatkan lebih cepat.
3. Dapat dilakukan pengendalian suhu *heat exchanger* dengan metode *fuzzy gain scheduling*, kendali adaptif STR (*Self Tuning Regulator*), dan jaringan saraf tiruan.

Daftar Pustaka

- [1] Carlos A. Smith and Armando B., *Principles And Practice of Automatic Process Control*, John Wiley & Sons, Canada, 1985.
- [2] Gunterus, Frans, *Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses*, PT Elex Media Komputindo, Jakarta, 1997.
- [3] Malvino. "*Prinsip – Prinsip Elektronika*". Jakarta : Erlangga, 1996.
- [4] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*, diterjemahkan oleh Edi Leksono, Erlangga, Jakarta, 1994.
- [5] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik Jilid 2*, diterjemahkan oleh Edi Leksono, Erlangga, Jakarta, 1994.
- [6] Setiawan, Iwan, *Kontrol PID untuk Proses Industri*, PT. Elex Media Komputindo, Jakarta, 2008.
- [7] Wibowo Wisnu, *Aplikasi Teknik Kendali Gain Scheduling Pada Sistem Kontrol Valve Untuk Pengendalian Tinggi Muka Cairan Pada Limas Terpancung*, Skripsi S-1, Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang.