

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI KENDALI MODEL DRIVEN PID PADA SISTEM PEMANAS AIR

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MODEL DRIVEN PID CONTROLLER IN WATER HEATER SYSTEM

Tommy Hondianto¹

Erwin Susanto, Ph.D²

Agung Surya Wibowo, ST., MT.³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

Jalan Telekomunikasi, Dayeuh Kolot Bandung 40257 Indonesia

¹tommyh@students.telkomuniversity.ac.id, ²erwinelektro@telkomuniversity.ac.id,

³agungsw@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Kendali PID telah banyak digunakan sebagai salah satu aplikasi sistem kendali di industri. Namun, untuk pengaturan parameter tidaklah sederhana dan memiliki kendala dalam menangani sistem dengan respon yang lambat, sebagai contoh sistem boiler misalnya. Oleh karena itu, kendali *Model Driven PID* (MD PID) dirancang untuk menangani masalah ini, terutama untuk plant dan proses dengan respon yang relatif lambat. Kendali MD PID menggunakan model dari plant sebagai model acuan sistem kendali. Respon yang telah didapat, dianalisis dan dibandingkan antara kendali PI dan MD PID. Hasil dari pengujian, kendali PI sedikit lebih cepat dengan *rise time* 106.4969s sedangkan MD PID memiliki *rise time* 110.0801s. Namun kendali MD PID memiliki nilai *overshoot* lebih kecil yaitu 3.4°C, sedangkan kendali PI memiliki nilai *overshoot* 7.325°C

Kata kunci : *Model Driven PID*, Pemanas Air, PT100, Matlab

Abstract

PID controller has been widely used as one of the basic property controllers in industry. However, tuning PID parameters is not simple and also has a few problems in handling slow response systems, such as boiler. Therefore, the Model Driven PID (MD PID) control is designed for solving these problems, especially for plants or processes with slow response. The MD PID is using the model of the plant itself as the basic model of the controller. The step responses have been compared and analyzed the difference between PI and MD PID controller. From the examination, PI controller gives bit faster performance with rise time 106.4969s compared to MD PID with rise time 110.0801s. But MD PID controller gives smaller overshoot with the value 3.4°C, while PI controller gives 7.325°C.

Keywords: *Model Driven PID*, Water Heater, PT100, Matlab

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Sistem kendali PID (*Proportional, Integral, and Derivative*) [1] konvensional sudah banyak digunakan sebagai dasar sistem kendali di industri. PID konvensional sendiri terbukti baik dalam menangani sistem dengan respon yang cepat seperti pada motor DC, motor *Stepper*, dsb. Namun untuk pengaturan parameter PID tidak sederhana, seperti pada proses dengan *dead time* yang lama, sistem yang berosilasi, sistem yang memiliki *pole* yang tidak stabil, sistem yang memiliki *zero*, dan terutama untuk sistem dengan respon yang sangat lambat untuk mencapai suatu nilai yang ditetapkan. Seperti aplikasi pada *boiler* industri yang memerlukan ketetapan suhu untuk menghasilkan uap yang dipakai sebagai energi. Suhu yang dihasilkan tidak akan dengan cepat berubah dengan cepat sesuai dengan ketetapan nilai *set point*, respon yang dihasilkan akan sangat lambat dan tidak jarang sulit untuk mencari parameter PID yang tepat dan juga sistem rentan *overshoot*. Untuk itu dikembangkanlah suatu metode kendali khusus untuk menangani *plant* atau proses dengan respon yang relatif lambat, yaitu kendali MD PID yang diharapkan menghasilkan respon yang lebih baik.

Fitur kendali MD PID terdiri dari *PD feedback*, *Q-filter 2nd order*, dan *set point filter*. Keunggulan dari model sistem ini adalah strukturnya yang sederhana dan arsitektur yang mudah untuk dimengerti, pengaturan yang mudah, dan memiliki ketahanan sistem. Hasil respon dari kendali MD PID diharapkan lebih cepat dan tidak memiliki *overshoot*. Kendali MD PID tidak menggunakan metode Zeigler-Nichols untuk pencarian parameternya.

Pada tugas akhir ini penulis akan merancang sebuah sistem pemanas air yang dihubungkan dengan mikrokontroler untuk menganalisa respon temperatur air terhadap nilai masukan atau *set point* ke mikrokontroler. Sensor yang digunakan untuk mengukur nilai temperatur air adalah RTD (*Resistance Temperature Detector*) tipe PT100 yang nilai pembacaannya akan digunakan sebagai nilai umpan balik. Respon yang dihasilkan oleh sistem pemanas air akan dibaca dan di-*plotting* melalui komunikasi *serial* di matlab.

1.2 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menghasilkan respon sistem yang lebih baik dibanding dengan metode kendali PID konvensional.
2. Merancang model sistem kendali PID yang mudah dalam sistem pengaturan parameternya.
3. Merancang model sistem kendali yang memiliki ketahanan dan stabil.
4. Merancang sistem pemanas air agar dapat menghasilkan nilai suhu yang sesuai dengan *set point*.

1.3 Rumusan Masalah

Masalah yang dibahas pada tugas akhir ini adalah:

1. Menerapkan kendali MD PID pada sistem.
2. Menerapkan sensor RTD tipe PT100 sebagai sensor dan umpan balik sistem.
3. Merealisasikan sistem pemanas air sebagai plant dari sistem.
4. Menganalisis hasil respon dari sistem dan kemudian membandingkannya dengan kendali PID konvensional.

1.4 Batasan Masalah

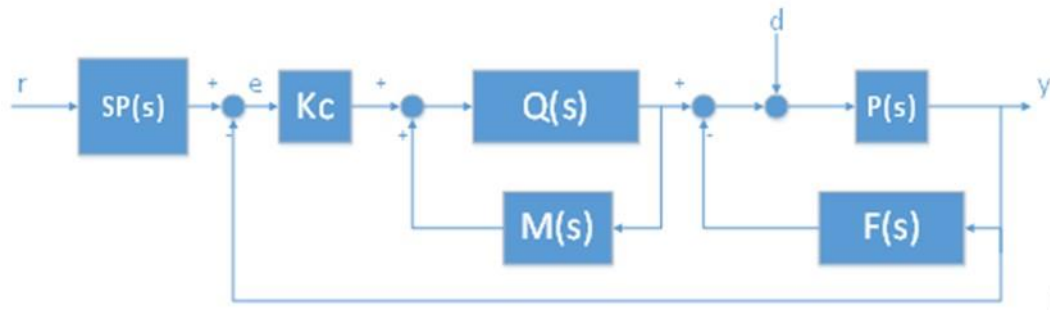
Batasan masalah yang digunakan pada tugas akhir ini adalah:

1. Sistem kontrol pemanas air menggunakan MD PID sebagai kendalinya.
2. Pencarian nilai parameter sistem menggunakan metode Model Matching Kitamori.
3. Sensor suhu yang digunakan adalah RTD tipe PT100.
4. Menggunakan mikrokontroler AVR ATmega2560 yang ditanam bootloader sehingga dapat diprogram langsung menggunakan Arduino IDE (Integrated Development Environment).
5. Plant yang digunakan adalah pemanas air.
6. Matlab/Simulink digunakan sebagai simulator dan analisis respon dari sistem.
7. Volume air yang digunakan adalah 1.5L.

2. Dasar Teori /Material dan Metodologi/perancangan

2.1 Model Driven PID

Model Driven PID atau MD PID [2] adalah sebuah metode kendali yang menggunakan prinsip kerja IMC (*Internal Model Control*) dan juga hasil perkembangan dari kendali PID konvensional beserta fitur-fitur tambahannya. Dibandingkan dengan kendali PID konvensional, MD PID lebih ditujukan untuk sistem *plant* yang memiliki *dead time* yang lama dan respon yang lambat. Pada kendali MD PID memiliki fitur tambahan seperti umpan balik PD, Q-filter, dan *set point filter*.



Gambar 1. Blok Diagram MD PID

Blok diagram dari MD PID (Gambar 2.1) terdiri dari tiga bagian utama, yaitu PD *feedback*, *main controller*, dan *set point filter*. Pada bagian kendali terdiri dari blok penguat kendali (K_c). $Q(s)$ adalah Q filter orde dua yang ditetapkan dengan parameter *tuning* λ (lamda) dan α (alfa) seperti pada persamaan (1), dan model orde satu dengan *dead time* seperti pada persamaan (2). Persamaan (3) adalah persamaan dari *set point filter*.

$$Q(s) = \frac{(1 + \lambda s)(1 + \alpha s)}{s^2} \quad (1)$$

$$M(s) = \frac{1}{1 + \lambda s} \quad (2)$$

$$F(s) = \frac{1 + \lambda s}{1 + \alpha s} \quad (3)$$

Dengan menggunakan Q filter orde dua, sistem kendali MD PID dapat memberikan kemampuan untuk menangani regulasi gangguan dengan cepat dengan cara mengatur nilai parameter α . Dan dengan menggunakan *set point filter*, karakteristik transfer dari r ke y menjadi sistem orde satu dengan *dead time*. Dengan demikian sistem kendali MD PID memiliki kemampuan *set point tracking* tanpa *overshoot*.

Tahap pertama perancangan dimulai dari blok PD *feedback compensator*. Fungsi dari PD *feedback compensator* adalah untuk menstabilkan dan menyeimbangkan fungsi alih $P(s)$. $P(s)$ sendiri adalah *plant* atau proses yang telah dimodelkan sehingga didapati nilai fungsi alih dari $P(s)$. Jika fungsi alih $P(s)$ telah diketahui, maka fungsi alih $G(s)$ dan parameter blok PD dapat ditentukan.

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{2}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{2}} \approx \frac{1}{1 + \frac{1}{2}} \tag{4}$$

$$G(s) = \frac{K(1 + \tau_D s)}{1 + \tau_I s} \quad (5)$$

Pada persamaan (4) adalah fungsi alih *single loop* dari *plant* dengan blok PD. Persamaan (5) adalah fungsi alih PD *feedback*.

Ada beberapa metode untuk mendesain PD *feedback* $F(s)$ melalui fungsi alih $P(s)$, yaitu metode *model matching* [3] Kitamori, metode daerah frekuensi, simulasi dan optimasi.

Tahap kedua dari perancangan sistem adalah mengatur komponen parameter kendali yang telah disesuaikan dari persamaan (4) seperti berikut:

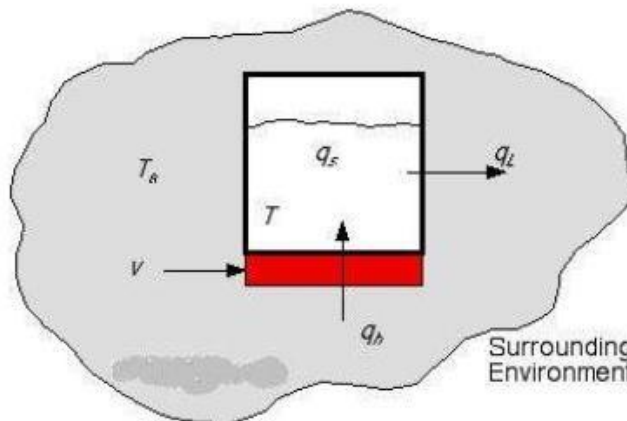
- 1) $K_c = 1/K$:Gain
- 2) $T_c = T$:Integral Time Constant
- 3) $L_c = L$:Dead Time

Tahap yang terakhir dilakukan pengaturan beberapa pengaturan parameter tuning λ (lamda) dan α (alfa) dimana nilai parameter λ untuk pengaturan respon kecepatan sistem dan α untuk pengaturan kemampuan regulasi gangguan sistem. Nilai *output* y dapat diturunkan sebagai berikut (6):

$$y = \frac{\exp(-\lambda t) - \exp(-\alpha t)}{\lambda - \alpha} + \frac{(1 + \alpha \tau_D)(1 + \tau_I \lambda)}{(1 + \alpha \tau_D)^2} \left[1 - \frac{\exp(-\lambda t)}{\lambda} + \frac{\exp(-\alpha t)}{\alpha} \right] \quad (6)$$

Model sistem kendali MD PID harus mengetahui pemodelan atau fungsi alih dari *plant* terlebih dahulu, maka sistem dapat dirancang dengan mudah sesuai dengan prosedur perancangan. Kendali MD PID hanya memiliki dua parameter *tuning* yaitu λ dan α untuk mengatur kecepatan respon dan juga regulasi gangguan. MD PID diutamakan untuk mengatasi proses dengan *dead time* yang lama yang sulit diatasi pada sistem kendali PID konvensional namun dapat juga direalisasikan pada sistem dengan *dead time* yang lebih singkat.

2.2 Model Pemanas Air



Gambar 2. Model dari Pemanas Air[4]

Pemanas air (Gambar 2) harus dimodelkan terlebih dahulu untuk mendapatkan parameter kendali. Pendekatan pemodelan dari pemanas air menggunakan pendekatan fisika. Berikut persamaan pemodelan sistem.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{C + 1} \quad (7)$$

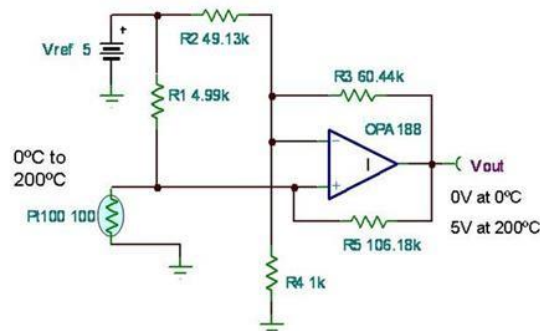
$$T = \frac{k}{C + 1} + 1 \quad (8)$$

Persamaan (7) menunjukkan sistem orde satu dengan mempertimbangkan nilai *dead time* pada sistem maka akan didapat persamaan fungsi alih dari pemanas air (8), dimana konstanta $K = k \cdot R$ dan $T = C \cdot R$. Parameter k , R , dan C adalah konstanta pemanas, resistansi termal dari dinding tanki, dan kapasitas termal dari zat cair.

2.3 RTD

RTD atau *Resistance Temperature Detector* [5] adalah sebuah divais yang berfungsi untuk mengetahui nilai temperatur dengan mengukur nilai resistansi dari kabel elektrik. Sensor RTD yang digunakan adalah tipe PT100. Sensor PT100 berbahan logam platina dengan nilai resistansi 100 Ω pada temperatur referensinya di 0°C. Nilai dari resistansi sensor ini berubah dan bertambah 0.385 Ω setiap kenaikan 1°C. Dari persamaan (9) dapat dilihat sifat linearitas pengukuran sensor PT100. Nilai T adalah nilai temperatur yang terukur, dan T_{ref} adalah temperatur acuan pada nilai resistansi sensor yaitu 0°C.

$$Z_{100} = 100 + [(Z - Z_{00})^{\circ} C] 0.385 [100] \quad (9)$$



Gambar 3. Rangkaian Sensor PT100 [6]

Sensor RTD memiliki nilai resistansi yang berubah-ubah, maka dari itu diperlukan rangkaian khusus (Gambar. 3) untuk membaca nilai sensor dalam bentuk tegangan yang dapat menjaga linearitas sensor. Konfigurasi rangkaian ini menggunakan jembatan Wheatstone dan penguat operasional (Op-Amp) sebagai penguat diferensial. Nilai jarak pengukuran linearitas sensor pada rangkaian ini antara 0°C-200°C untuk nilai tegangan 0-5 Volt.

Penentuan nilai dari resistor dapat dicari dengan teknik iteratif. Persamaan yang digunakan pada (10) untuk mendapatkan nilai resistansi yang terdekat dan pengaruhnya pada (11)

$$V_{out} = \frac{V_{ref} \cdot (R_2 \parallel R_3)}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} + \frac{V_{ref} \cdot (R_2 \parallel R_3)}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} \quad (10)$$

$$V_{out} = V_{ref} \left[1 + \frac{R_3}{R_2} \right] \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (11)$$

Tabel 1 Sifat Linearitas Pengukuran

Temp °C	RTD (V)	Vout (V)	Nonlin.
0	0.09814	0	0.000%
20	0.10612	0.49984	-0.003%
40	0.11409	0.99978	-0.004%
60	0.12207	1.49981	-0.004%
80	0.13005	1.99989	-0.002%
100	0.13803	2.5	0.000%
120	0.14601	3.00011	0.002%
140	0.15399	3.5002	0.004%
160	0.16197	4.00022	0.004%
180	0.16995	4.50017	0.003%
200	0.17792	5	0.000%

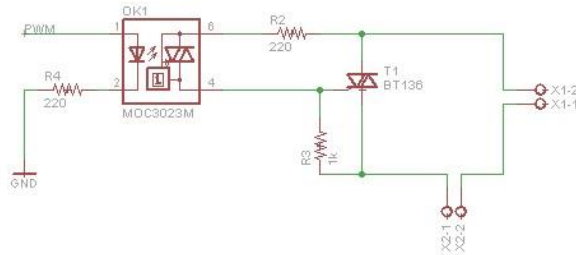
Tabel 1 menunjukkan sifat linearitas pengukuran temperatur dari sensor PT100. Dari hasil ini terlihat bahwa sensor memiliki nonlinearitas atau galat pada nilai tengah 0°C-100°C dan 100°C-200°C. Semakin ditengah, maka nonlinearitas pengukuran akan semakin besar. Namun sifat nonlinearitas pengukuran sangat kecil, sehingga nilai kesalahan ini dapat ditoleransi.

2.4 Triac

Triac, atau *Triode for Alternating Current* (Trioda untuk arus bolak-balik) [7] adalah sebuah komponen elektronik yang ekuivalen dengan dua SCR yang disambungkan antiparalel dan kaki gerbangnya disambungkan bersama. Nama lain dari *Triac* adalah *Bidirectional Triode Thyristor*.

Triac merupakan komponen semikonduktor yang tersusun atas empat lapis dioda berstruktur p-n-p-n dengan tiga p-n *junction*. *Triac* memiliki tiga buah elektroda, yaitu gate, MT1, MT2. *Triac* biasanya digunakan sebagai pengendali dua arah (*bi-directional*).

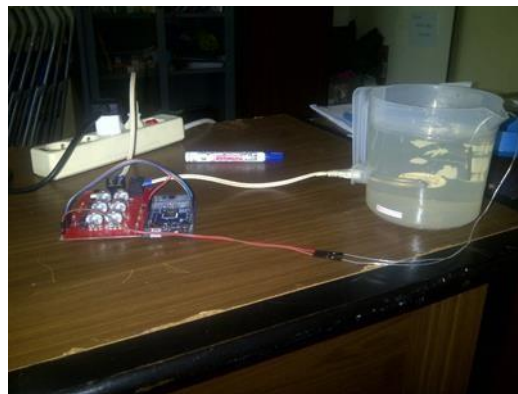
2.5 Rangkaian Pemanas



Gambar 4. Rangkaian Pemanas

Pada rangkaian pemanas digunakan komponen *triac* untuk *triggering* sinyal tegangan AC dari PLN (220Vac/50Hz) seperti pada Gambar 4. *Pulse Width Modulation* (PWM) digunakan untuk mengaktifkan Light Emitting Diode (LED) di dalam *opto-triac*. Nilai frekuensi dari PWM adalah 490 Hz. PWM dari mikrokontroler memiliki rentang hingga 7 bit atau 0-255 desimal.

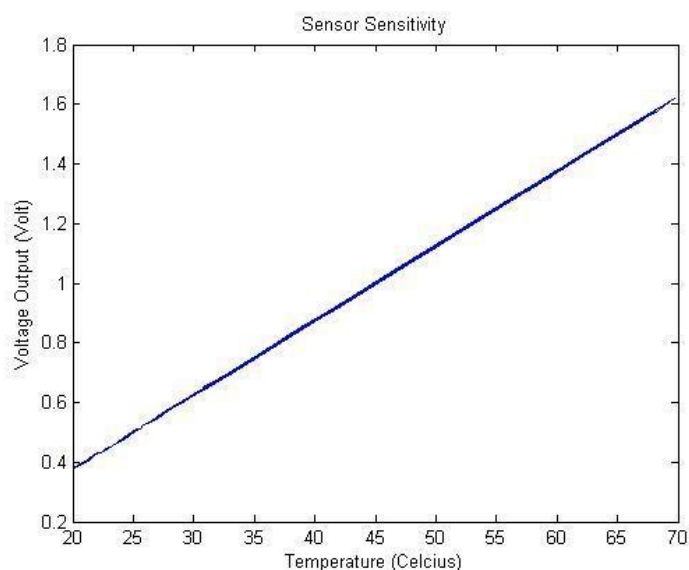
3. Pembahasan



Gambar 5. Perangkat Sistem Pemanas Air

Pengujian dan analisis sistem akan dirancang dan diimplementasikan menggunakan pemanas air sederhana. Model sistem kendali yang tertanam di mikrokontroler berfungsi untuk memproses sistem pemanasan air. Sensor PT100 akan mengukur nilai dari temperatur air dan dibaca secara analog pada mikrokontroler. Nilai dari pembacaan temperatur tersebut akan menjadi bahan analisis respon sistem dan akan di-plot pada perangkat lunak Matlab untuk dianalisis lebih lanjut. Pengujian ini membandingkan dua macam jenis sistem kendali yaitu MD PID dan kendali PI untuk melihat perbedaan nyata dari kedua sistem kendali ini.

3.1 Pengujian Sensor PT100



Gambar 6. Sensitivitas sensor PT100

Dari hasil pengujian yang ditunjukkan pada gambar 5, menunjukkan sifat linearitas dari sensor PT100. Pengujian membandingkan sensitivitas temperatur terhadap tegangan keluaran dari sensor yang akan dibaca oleh *Analog to*

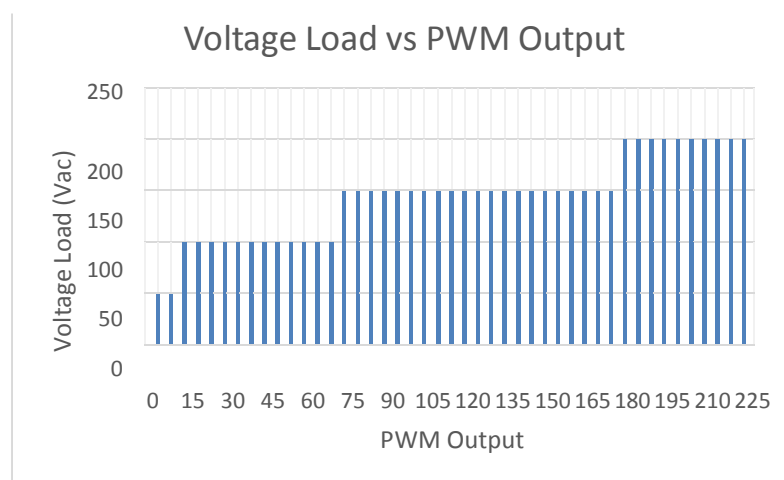
Digital Converter (ADC). Rentang pengujian temperatur antara 20°C hingga 70°C. Nilai dari pembacaan sensor terhadap temperatur air sudah cukup baik untuk pengujian pengukuran nilai temperatur, walaupun masih memiliki sedikit nilai pergeseran atau nonlinearitas pengukuran yang sangat kecil.

Mikrokontroler menerima resolusi tegangan ADC sebesar 10 bit atau 1023 desimal. Nilai maksimal masukan ke pin analog adalah sebesar 5V atau sesuai dengan resolusi maksimal mikrokontroler yaitu 10 bit. Pada rangkaian sendiri menghasilkan range pengukuran temperatur dari 0°C-200°C untuk 0-5V. Jadi untuk persamaan pembacaan dari rangkaian sensor dalam tegangan menjadi bentuk nilai temperatur adalah sebagai berikut (12);

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1023} 200 [^{\circ}\text{C}] \quad (12)$$

Dengan menggunakan persamaan (12) nilai dari pin masukan analog mikrokontroler akan memberikan langsung nilai temperatur yang terukur dalam bentuk satuan °C. Nilai pembacaan ini akan menjadi nilai *feedback* sistem.

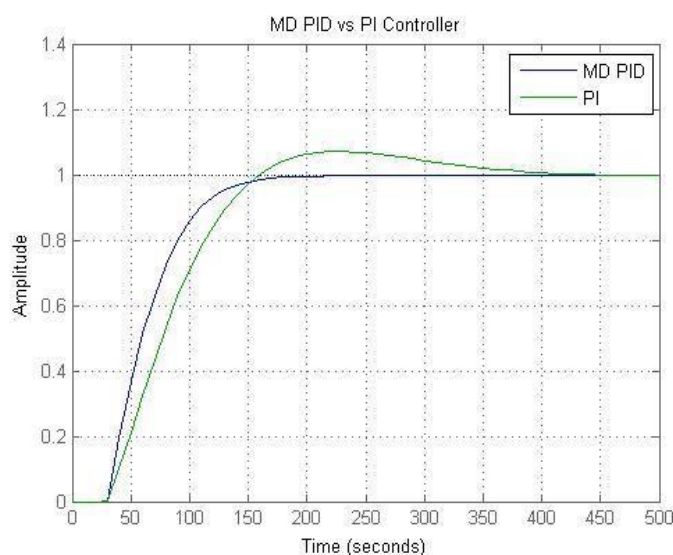
3.2 Pengujian PWM



Gambar 7. Voltage Load vs PWM Output

Dari hasil pengujian pada gambar 6, terlihat nilai PWM berbanding lurus terhadap nilai tegangan yang diberikan kepada beban. Grafik dari gambar 6, tidak terlihat terlalu linear walaupun nilainya selalu berbanding lurus. Perbedaan nilai frekuensi antara frekuensi PWM (490 Hz) dan frekuensi tegangan sumber PLN (50 Hz) bisa menjadi salah satu faktor ketidak-linearitas tersebut.

3.3 Pengujian Model Pemanas Air

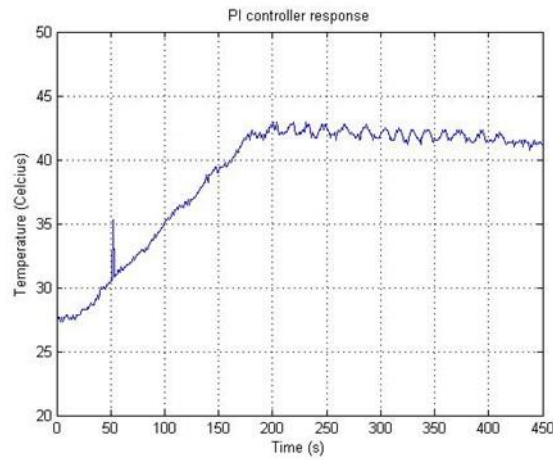


Gambar 8. Voltage Load vs PWM Output

Gambar 8, menunjukkan perbandingan respon step antara kendali MD PID dengan PI. Dari perbandingan dari kedua metode kendali ini, kedua sistem kendali sama-sama mencapai titik set point dalam rentang waktu yang sama, namun hasil respon dari kendali MD PID lebih stabil. Sedangkan kendali PI memiliki respon yang overshoot, sehingga nilai yang terukur melampaui nilai dari set point dalam rentang waktu yang cukup lama.

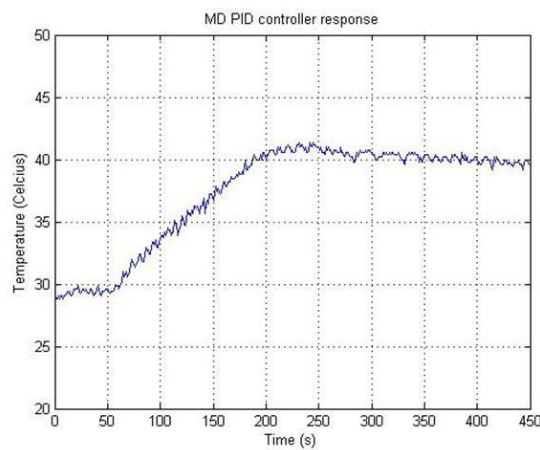
Rentang waktu pembacaan respon adalah 450 detik. Untuk parameter kendali PI digunakan $K_p=0.2178$ dan $K_i=0.003886$. Pada MD PID menggunakan parameter $\lambda=1$ dan $\alpha=1$. Parameter kendali lain dari MD PID seperti K_f , T_f , K , T , dan L dicari menggunakan metode model matching Kitamori.

3.4 Pengujian Pemanas Air dengan Kendali PI



Gambar 9. Step-Response PI Controller

3.5 Pengujian Pemanas Air dengan Kendali MD PID



Gambar 10. Step-Response MD PID Controller

3.6 Hasil Pengujian Keseluruhan

Tabel 2 Pengujian Kendali PI vs MD PID

	PI Controller	MD PID Controller
Rise Time	106.4969s	110.0801s
Settling Time	NaN	449.8850s
Settling Min	38.2400°C	38.8200°C
Settling Max	42.9300°C	41.3600°C
Overshoot	7.3250°C	3.4000°C
Undershoot	0	0
Peak	42.9300°C	41.3600°C
Peak Time	201s	231s

Tabel 2 menunjukkan perbandingan dari sistem kendali PI dengan MD PID. Kendali PI memiliki *rise time* yang lebih cepat dibanding dengan kendali MD PID. Namun nilai *overshoot* pada kendali MD PID lebih kecil dibanding dengan kendali PI. Kendali PI juga belum mencapai nilai *settling time* untuk rentang waktu pengujian yang cukup lama yaitu 450 detik.

4. Kesimpulan

Kedua jenis sistem kendali yaitu MD PID dan PI telah diaplikasikan pada sistem pemanas air. Terlihat dengan adanya penambahan blok *Q filter* orde dua, model orde satu dengan *dead time*, *set point filter*, dan juga umpan balik PD, memberikan hasil yang lebih stabil dibanding saat pengujian menggunakan metode PID konvensional (PI). Namun kendali PI memiliki nilai *rise time* yang lebih kecil yaitu 106.4969s, sedangkan kendali MD PID memiliki *rise time* 110.0801s yang berarti respon MD PID disini lebih lambat dibanding dengan kendali PI.

Kendali PI memberikan nilai *overshoot* yang lebih besar, yaitu 7.325°C dari nilai *set point*, sedangkan kendali MD PID memiliki *overshoot* 3.4°C. Maka dari itu hasil dari respon kendali MD PID lebih stabil menuju nilai *set point*.

Namun untuk sistem kendali MD PID harus melakukan fase pemodelan sistem terlebih dahulu untuk mencari parameter *tuning* dari sistem kendali. Sedangkan pada PID konvensional dapat menggunakan metode *trial and error* dalam pencarian parameter *tuning*.

Selanjutnya, sistem kendali MD PID dalam pengujian ini membuktikan dapat menghasilkan respon yang lebih stabil dalam menangani *plant* atau proses dengan respon yang relatif lambat dan juga rentan *overshoot*.

Daftar Pustaka:

- [1] Astrom, K.J dan Hagglund, T. 1995. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Research Triangle Park: Instrument Society of America.
- [2] Shigemasa, T. dan Yukitomo, M. (2004) "Model-Driven PID Control Systems, its properties and multivariable application". Proceedings of Advance Process Control Applications for Industry Workshop, Vancouver.
- [3] Shigemasa, T., Yukitomo, M., dan Kuwata, R. (2002) "A Model-Driven PID Control System and its Case Studies". *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Control Applications*, 571-576.
- [4] Suthar, H.A. dan Gadit, J.J. Dr, (2011) "Modeling and Analysis of the Simple Water Heater System". *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 1, (1), 49-52.
- [5] Cooper, W.D, (1999). *Instrumentasi Elektronik dan Teknik Pengukuran*. Jakarta: Erlangga.
- [6] Trump, B., (2011) "Analog Linearization of resistance temperature detectors". *Texas Instruments: Analog Applications Journal*. 21-24.
- [7] Boylestad, R. dan Nashelsky, L. 1998. *ELECTRONIC DEVICES AND CIRCUIT THEORY 7th Edition*. New Jersey: Prentice Hall.