



Simulasi Kontrol PID Terintegrasi dengan PLC dan HMI untuk Proses *Mixing* pada Kolam Hidroterapi Sistem *Indirect Evacuated Tube Solar Water Heater*

Rudy Setiawan[✉], M. Munadi², Mohammad Imam Wirduni²

Fakultas Kemaritiman Universitas IVET¹, Departemen Teknik Mesin Universitas Diponegoro²

DOI: <https://doi.org/10.31331/maristec.v2i2>

Info Articles

Sejarah Artikel:

Disubmit November 2021

Direvisi Desember 2021

Disetujui Januari 2022

Keywords:

Therapeutic Pool, Indirect evacuated tube solar water heater, PLC, HMI

Abstrak

Jumlah penderita *stroke* di Indonesia semakin meningkat setiap tahun. Hal ini menjadikan penyakit *stroke* penyebab kematian tertinggi yang berada di bawah penyakit jantung dan kanker. Salah satu usaha penyembuhan penyakit *stroke* dapat ditempuh dengan cara terapi di dalam kolam menggunakan media air hangat atau disebut juga dengan hidroterapi. Hidroterapi merupakan salah satu metode terapi penyembuhan terhadap penyakit persendian yang kaku akibat *stroke*. Oleh karena itu dalam penelitian ini dibuat suatu sistem *indirect evacuated tube solar water heater* pada kolam hidroterapi, dimana kolam hidroterapi dikondisikan pada temperatur 31 - 34 °C. Pada sistem ini, alat pemanas air menggunakan kolektor jenis *indirect evacuated tube solar collector*, dimana alat tersebut memanfaatkan sinar matahari untuk memanaskan fluida pemanas berupa etilen glikol yang kemudian akan memanaskan air di dalam *coiled tube*. Untuk mendapatkan dan menjaga temperatur air pada kolam hidroterapi (proses *mixing*) supaya tetap dalam *set value* maka dibutuhkan sebuah sistem control. Sistem kontrol yang digunakan berbasis PID yang terintegrasi dengan PLC dan HMI. PLC dan HMI tersebut akan mengendalikan fungsi dari aktuator dan sensor, dimana aktuator yang digunakan yaitu *motorized dc valve*, *solenoid valve* dan pompa. Kemudian sensor temperatur yang digunakan adalah *thermocouple* tipe K.

Abstract

The number of stroke patients in Indonesia is increasing every year. This makes stroke as the most dangerous disease after heart disease and cancer. One of the methods to remedy the stroke disease can be reached by doing a therapy using media of a pool with warm water or also called hydrotherapy. Hydrotherapy is one method of healing therapies against diseases caused by stroke stiff joints. Therefore, in this study will be made an indirect system of evacuated tube solar water heater on a hydrotherapy pool, a hydrotherapy pool which is conditioned at a temperature of 31-34 °C. In this system, water heater using indirect type of evacuated tube solar collector, where the device uses sunlight to heat a fluid heater in the form of ethylene glycol, which then heats the water in the coiled tube. To obtain and maintain the water temperature at a hydrotherapy pool (mixing process) in order to remain in the set of values we need a control system. The control system is used with integrated PID-based PLC and HMI. PLC and HMI will control the functions of the actuators and sensors, wherein the actuator used is a motorized dc valve, solenoid valve and pump. Then the temperature sensor used is a thermocouple type K.

✉Alamat Korespondensi:

E-mail: rudy....@gmail.com

ISSN : 2746-1580

PENDAHULUAN

Di era modernisasi saat ini, jumlah penderita *stroke* terus meningkat setiap tahunnya. *Stroke* merupakan penyakit yang menyerang otak dimana penyakit tersebut timbul secara mendadak akibat tersumbat atau pecahnya pembuluh darah otak. Setelah penyakit jantung koroner dan kanker *stroke* merupakan penyakit yang menjadi penyebab kematian ketiga di negara-negara berkembang [1]. *Stroke* telah menjadi masalah kesehatan global dan penyebab utama kecacatan selain itu *stroke* juga merupakan penyebab utama dari sebuah kesakitan dan kematian [2]. Menurut data WHO, ada 15 juta populasi terserang *stroke* setiap tahun di seluruh dunia dan terbanyak adalah usia tua dengan rentang usia antara 55 - 85 tahun. Menurut riset kesehatan dasar 2013, prevalensi *stroke* di Indonesia mencapai 12,1 per 1000 orang. Jumlah penderita *stroke* diperkirakan terus meningkat sejalan dengan melonjaknya faktor risiko dan penduduk usia lanjut. Di samping itu *stroke* juga merupakan penyebab utama kecacatan ringan maupun berat, sehingga keadaan tersebut menempatkan *stroke* sebagai masalah kesehatan yang serius [3].

Untuk menghindari serangan *stroke*, seseorang bisa melakukan berbagai tindakan pencegahan, termasuk membiasakan diri menjalani gaya hidup yang sehat. Tetapi bagi penderita *stroke*, terdapat salah satu cara untuk meringankan atau mengobatinya dengan cara melakukan terapi dengan air hangat. Dasar utama penggunaan air hangat untuk pengobatan adalah efek *hydrostatic* dan *hydrodynamic*. Terapi ini merupakan salah satu metode terapi penyembuhan terhadap penyakit persendian yang kaku akibat *stroke* [4]. Metode hidroterapi pada *therapeutic pool* diilustrasikan pada Gambar 1 [5].



Gambar 1. Metode hidroterapi pada *therapeutic pool*

Berdasarkan beberapa kajian pendahuuan menyatakan bahwa dalam membantu mengurangi penderita penyakit *stroke* dapat dilakukan menggunakan kolam hidroterapi menggunakan air hangat bersuhu rata-rata 31 - 34°C. Pada penelitian ini, *kolam hidroterapi* yang dirancang akan menggunakan teknologi *indirect evacuated tube solar water heater* untuk memanfaatkan sinar matahari sebagai sumber panasnya. Dalam perancangan pemanas air sistem *indirect evacuated tube solar water heater* pada kolam hidroterapi membutuhkan sistem kontrol otomatis. Sistem kontrol otomatis yang akan digunakan pada alat pemanas air menggunakan sistem kontrol berbasis PLC (*Programmable Logic Controller*) [6]. PLC menurut NEMA (The National Electrical Manufacturers Association) didefinisikan sebagai perangkat elektronika digital yang dapat diprogram menggunakan memori sebagai penyimpan internal dari sekumpulan instruksi dengan mengimplementasikan fungsi-fungsi tertentu, seperti untuk mengendalikan berbagai jenis mesin ataupun proses melalui modul I/O digital dan analog, logika, sekuensial, pewaktu, perhitungan, dan aritmetika [7].

METODE

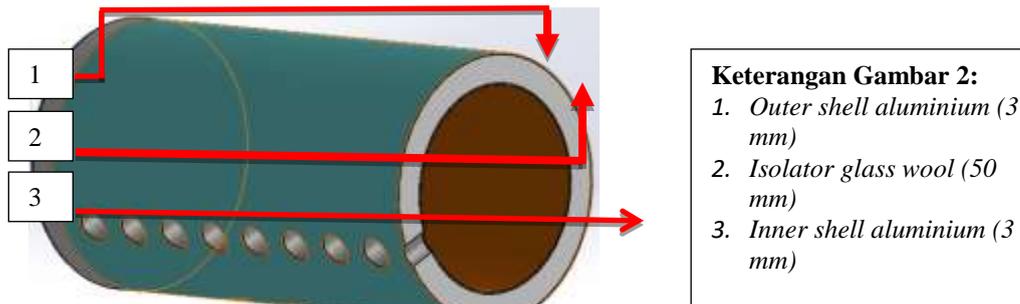
Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini merupakan metode eksperimental yang dijabarkan dalam beberapa tahapan.

Desain Indirect Evacuated Tube Solar Water Heater

Indirect evacuated tube solar water heater adalah salah satu jenis pemanas air yang memanfaatkan energi matahari untuk memanaskan fluida pemanas, yaitu *ethylene glycol*, yang akan digunakan untuk memanaskan air dengan konsep *heat exchanger*. Proses mendesain CAD *indirect evacuated tube solar water heater* menggunakan *software* SolidWorks.

Evacuated Tank (Tangki Penyimpanan)

Dalam artikel ini, dilakukan proses pendesainan ulang pada *evacuated tube solar water heater* yang telah didesain pada penelitian sebelumnya dengan menambahkan *heat exchange* menggunakan *software* SolidWorks. Desain *evacuated tank* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Evacuated tube solar collector

Coiled Tube

Coiled tube pada *indirect evacuated tube solar water heater* berfungsi sebagai alat penukar kalor (*heat exchanger*) yang digunakan untuk menghantarkan panas dari *ethylene glycol* ke air. *Heat exchanger* sendiri merupakan alat yang berfungsi untuk melakukan pertukaran energi terhadap dua fluida yang memiliki temperatur yang berbeda [8]. Jenis dari *heat exchanger* yang digunakan dalam suatu sistem tergantung pada banyak faktor diantaranya biaya, ketersediaan ruang, teknik pembuatan, kerja fluida, dan lain-lain [9]. Dalam membuat desain *coiled tube*, dipertimbangkan geometri dan material yang digunakan. Pada sisi material, penulis menggunakan material berjenis *stainless steel* SS304 atau baja tahan karat untuk menghindari adanya pengkaratan pada elemen pemanas. Selain itu, *stainless steel* memiliki nilai keuletan yang baik sehingga mudah dalam proses manufakturnya, dalam hal ini yaitu proses pengerolan. Material yang dirol berbentuk pipa dengan panjang keseluruhan 42 meter. Dengan menggunakan material *stainless steel*, *tube* tidak akan mengalami *tearing* saat dilakukan proses pengerolan. Pada sisi geometri, penulis menggunakan bentuk *coil* untuk meningkatkan nilai perpindahan kalor yang terjadi antara *ethylene glycol* dan air. Nilai perpindahan kalor dapat meningkat karena elemen pemanas yang berbentuk *coil* memiliki luas bidang kontak yang lebih besar dibandingkan dengan elemen pemanas berbentuk tabular. *Heat exchanger* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Heat exchanger

Assembly Sistem Mekanis dan Elektronis Sistem *Indirect Evacuated Tube Solar Water Heater*

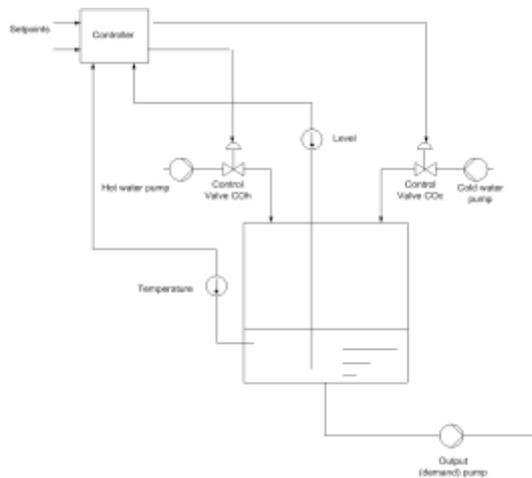
Setelah melakukan desain mekanis dan elektronis, masuk pada tahap mengimplementasikan hasil desain tersebut kedalam bentuk nyata. Gambar 4 menunjukkan hasil pembuatan sistem *indirect evacuated tube solar water heater*.



Gambar 4. Hasil pembuatan mekanis sistem *indirect evacuated tube solar water heater*

Pemodelan Sistem *Mixing Air Panas dan Air Dingin pada Therapeutic Pool*

Dalam penelitian ini, tahap selanjutnya adalah memodelkan proses *mixing* air panas dan air dingin pada *therapeutic pool* seperti ditunjukkan pada Gambar 5 dengan menggunakan persamaan-persamaan diferensial orde 1. Persamaan 1 adalah persamaan kesetimbangan massa yang digunakan untuk mendapatkan ketinggian air pada waktu tertentu dalam *therapeutic pool*. Sedangkan persamaan 2 adalah persamaan kesetimbangan energi yang digunakan untuk mendapatkan temperatur air pada waktu tertentu dalam *therapeutic pool*.



Gambar 5. Skematik diagram *therapeutic pool*

$$\frac{dV}{dt} = F_h + F_c - F_o \tag{1}$$

$$\frac{dE}{dt} = \rho c_p F_c T_c + \rho c_p F_h T_h - \rho c_p F_o T - hA(T - T_\infty) \tag{2}$$

Dimana:

V = volume air pada *therapeutic pool* (m³)

F_h = laju aliran volume air panas per satuan waktu (m³/s)

- F_c = laju aliran volume air dingin per satuan waktu (m^3/s)
- F_o = laju aliran volume air *drain* per satuan waktu (m^3/s)
- E = energi yang dimiliki sistem (Joule)
- h = koefisien perpindahan kalor konveksi ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$)
- ρ = massa jenis air (kg/m^3)
- c_p = kalor jenis air ($J/kg\text{ }^\circ\text{C}$)
- A = luas penampang perpindahan kalor (m^2)
- T = temperatur sistem ($^\circ\text{C}$)
- T_c = temperatur air dingin ($^\circ\text{C}$)
- T_h = temperatur air panas ($^\circ\text{C}$)
- T_∞ = temperatur udara lingkungan ($^\circ\text{C}$)

Beberapa asumsi yang diperlukan untuk mendapatkan solusi dari persamaan diferensial di atas antara lain:

- a. *Properties* air tetap/konstan
- b. Pencampuran air panas dan dingin yang sempurna dalam kolam *therapeutic pool*
- c. Udara dianggap gas ideal
- d. Penampang *therapeutic pool* tetap/konstan
- e. Laju aliran volume air yang masuk dan keluar bergantung pada *control valve*
- f. Temperatur air yang masuk ke dalam *therapeutic pool* tetap/konstan
- g. Kehilangan kalor hanya terjadi dalam 1 dimensi, yaitu melalui permukaan air pada *therapeutic pool*
- h. Modus kehilangan kalor dianggap menyerupai *free convection over flat plate*

Untuk mendapatkan persamaan perubahan ketinggian terhadap waktu, maka persamaan 3 dapat diturunkan sebagai berikut.

$$\frac{dV}{dt} = F_h + F_c - F_o \quad (3)$$

Dengan mensubstitusikan $V = Ah$ ke persamaan 3, dimana A adalah luas permukaan dasar *therapeutic pool* (m^2) dan h adalah tinggi muka air pada *therapeutic pool* (m), maka didapat,

$$\frac{d(AH)}{dt} = F_h + F_c - F_o \quad (4)$$

nilai A tidak berubah terhadap waktu/konstan, maka dapat dikeluarkan dari *bracket* sehingga,

$$\begin{aligned} A \frac{dH}{dt} &= F_h + F_c - F_o \\ \frac{dH}{dt} &= \frac{1}{A} (F_h + F_c - F_o) \end{aligned} \quad (5)$$

persamaan 5 menunjukkan hubungan antara perubahan ketinggian muka air pada *therapeutic pool* dengan laju aliran air yang masuk dan keluar *therapeutic pool*.

Untuk mendapatkan perubahan temperatur terhadap waktu, maka persamaan 4 dapat diturunkan sebagai berikut.

$$\frac{dE}{dt} = \rho c_p F_c T_c + \rho c_p F_h T_h - \rho c_p F_o T - hA(T - T_\infty)$$

mensubstitusikan $E = \rho Ahc_p T$ ke persamaan 2.4, maka didapat,

$$\frac{d(\rho Ahc_p T)}{dt} = \rho c_p F_c T_c + \rho c_p F_h T_h - \rho c_p F_o T - hA(T - T_\infty)$$

dengan mengasumsikan bahwa ρ dan c_p konstan, maka kita dapat menghilangkannya dari persamaan, sehingga menjadi,

$$\frac{d(AHT)}{dt} = F_c T_c + F_h T_h - F_o T - \frac{hA}{\rho c_p} (T - T_\infty)$$

nilai h dan T bergantung pada waktu sehingga dapat didiferensialkan menjadi,

$$AT \frac{d(H)}{dt} + AH \frac{d(T)}{dt} = F_c T_c + F_h T_h - F_o T - \frac{hA}{\rho c_p} (T - T_\infty)$$

mensubstitusikan persamaan 5 ke persamaan di atas menjadi,

$$T(F_h + F_c - F_o) + AH \frac{d(T)}{dt} = F_c T_{i,c} + F_h T_h - F_o T - \frac{hA}{\rho C_p} (T - T_\infty)$$

$$AH \frac{d(T)}{dt} = F_c (T_c - T) + F_h (T_h - T) - \frac{hA}{\rho C_p} (T - T_\infty)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{AH} \left[F_c (T_c - T) + F_h (T_h - T) - \frac{hA}{\rho C_p} (T - T_\infty) \right] \tag{6}$$

persamaan 6 menunjukkan hubungan antara perubahan temperatur air dalam *therapeutic pool* dengan energi yang dibawa oleh air panas dan air dingin yang masuk ke dalam sistem. Untuk mendapatkan nilai koefisien perpindahan kalor konveksi, digunakan persamaan 7, 8 dan 9.

$$h = \frac{k}{A/P} N_u \tag{7}$$

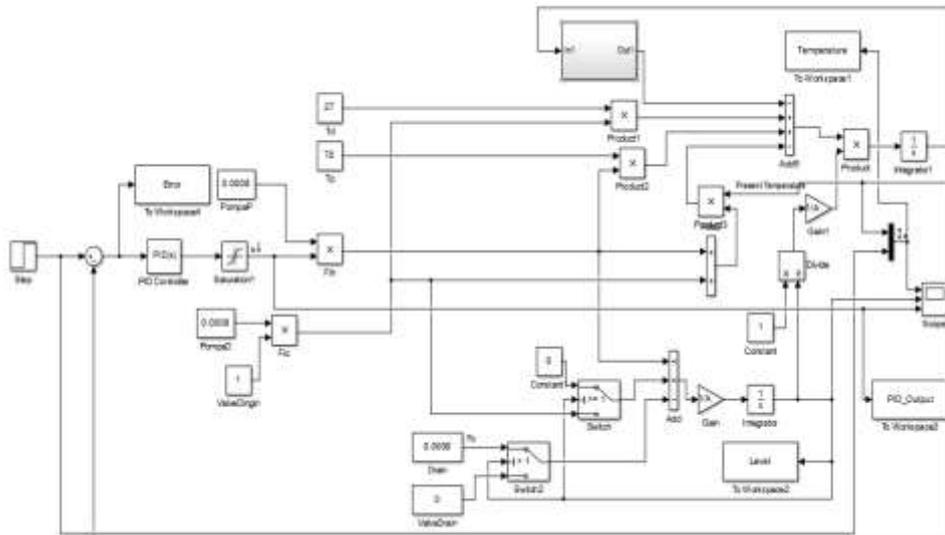
$$N_u = Ra_L^{1/4} \tag{8}$$

$$Ra_L = \frac{g\beta(T - T_\infty)(A/P)^3}{\nu^2} Pr \tag{9}$$

dimana :

- k = konduktivitas termal udara (W/m°C)
- P = perimeter penampang *therapeutic pool* (m)
- N_u = bilangan Nusselt
- Ra_L = bilangan Rayleigh
- Pr = bilangan Prandtl
- g = percepatan gravitasi (m/s²)
- β = koefisien ekspansi volume udara (1/°C)
- ν = viskositas kinematik air (m²/s)

Tahap berikutnya setelah mendapatkan persamaan diferensial yang dibutuhkan, maka dilakukan pembuatan model tersebut dalam MATLAB/Simulink. Secara umum MATLAB/Simulink didefinisikan sebagai salah satu software yang digunakan untuk analisis, *modeling*, dan menyelesaikan persoalan dinamik [10]. Gambar 6 menunjukkan pemrograman Simulink pada MATLAB.



Gambar 6. Model sistem *therapeutic pool* dengan *embedded* PID controller.

Adapun variabel bebas dan terikat dari sistem *therapeutic pool* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter sistem *therapeutic pool*

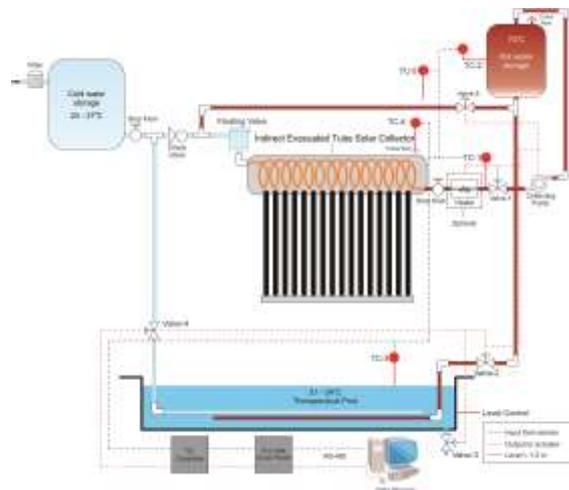
Parameter	Nilai
Temperatur air panas	$T_h = 70\text{ }^\circ\text{C}$
Temperatur air dingin	$T_c = 27\text{ }^\circ\text{C}$
Temperatur lingkungan	$T_a = 31\text{ }^\circ\text{C}$
Debit air dingin	$F_c = 0,0008\text{ m}^3$
Debit air panas	$F_h = 0,0008\text{ m}^3$
Debit air <i>drain</i>	$F_o = 0,0008\text{ m}^3$
Luas dasar kolam	$A = 3\text{ m}^2$
Temperatur kolam	T
Tinggi kolam	H

Pemodelan sistem dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink dengan rangkaian dasar blok diagram sistem *indirect evacuated tube solar water heater*. Pada blok diagram digunakan kontroler PID untuk mengoptimasi *gain* input dan respon *plant*. PID sendiri merupakan pengontrol yang outputnya terdiri dari penjumlahan tiga komponen yaitu proporsional, integral, dan derivatif [11]. Melalui blok *PID Controller* kita dapat mengatur seberapa cepat respon, seberapa banyak nilai *overshoot* dan juga seberapa stabilkah respon *plant*. Setelah melakukan pemodelan di dalam Matlab Simulink didapat *gain* paling optimal untuk sistem *indirect evacuated tube solar water heater* sebesar $K_p = 0,0945$, $K_i = 0,6226$, dan $K_d = -0.002$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Prinsip Kerja

Pada penelitian ini, sistem kendali yang berfungsi sebagai kontroler adalah PLC (*Programmable Logic Control*) dan *thermocontroller* TK4S-14cc. Kemudian aktuator yang digunakan pada sistem *indirect evacuated tube solar water heater* untuk model *therapeutic pool* adalah *solenoid valve*, *motorized dc valve* dan pompa. Sedangkan sensor temperatur yang digunakan dalam pembacaan temperatur adalah *thermocouple*. *Thermocouple* merupakan sensor temperatur yang banyak digunakan secara luas dalam dunia *engineering*, yang mana sensor tersebut memiliki karakteristik utama range pengukuran temperatur yang lebar, respon dinamik yang bagus serta kinerja yang stabil [12]. Adapun prinsip kerjanya dijelaskan pada Gambar 7.



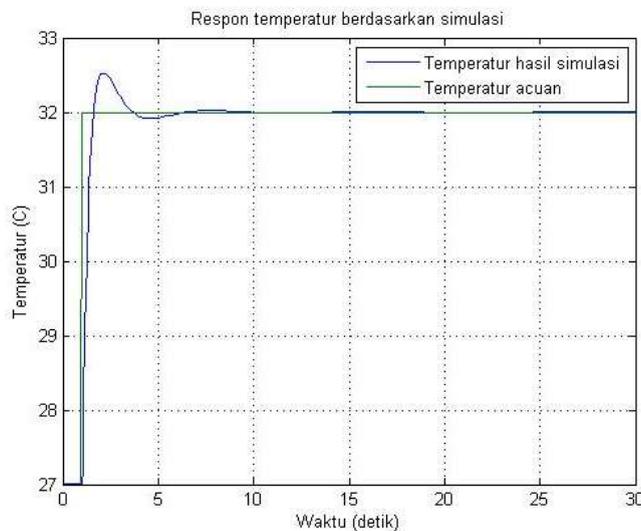
Gambar 7. Diagram schematic sistem *indirect evacuated tube solar water heater* untuk model *therapeutci pool*

Simulasi Desain Kontrol PID pada *Indirect Evacuated Tube Solar Water Heater*

Pada bagian ini akan menampilkan data hasil simulasi dan aplikasi dari keadaan *plant* berupa "hot valve" pada *indirect evacuated tube solar water heater* yang dihasilkan pada rangkaian *loop* tertutup. Nilai *setpoint* diatur pada suhu 32°C sebagai suhu target sistem *indirect evacuated tube solar water heater*. Simulasi dilakukan dalam rentang waktu tertentu dengan kondisi lingkungan diasumsikan berada dalam kondisi ideal. Berdasarkan hasil simulasi pengujian *indirect evacuated tube solar water heater* didapat nilai *tuning* yang terbaik untuk $K_p = 0,0945$, $K_i = 0,6226$, dan $K_d = -0,0021$. Tahap selanjutnya yaitu melakukan simulasi sistem dan didapat beberapa data berupa:

Respon Temperatur

Proses *mixing* air panas dan air dingin untuk menghasilkan nilai suhu tertentu di dalam *indirect evacuated tube solar water heater* diusahakan tidak memerlukan waktu lama namun tetap stabil pada saat sudah mencapai suhu targetnya (*setpoint*). Berikut respon temperatur berdasarkan simulasi ditunjukkan pada Gambar 8.

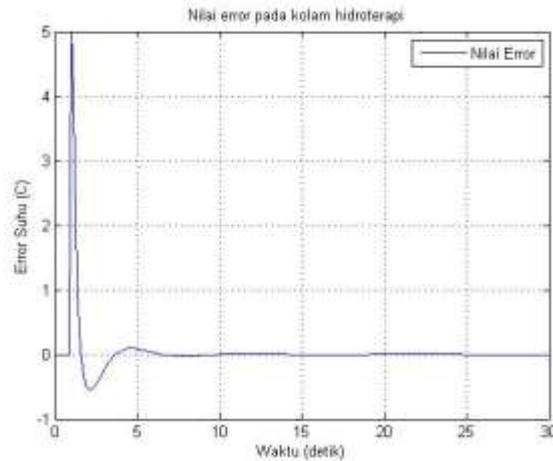


Gambar 8. Respon temperatur berdasarkan simulasi

Berdasarkan pada Gambar 8, respon temperatur naik dari suhu air normal ke suhu *setpoint* yang diatur sebelumnya. Sistem ini sangat stabil dengan nilai *steady state error* mendekati 0. Respon sistem sangat cepat walaupun terjadi *overshoot* dan sedikit osilasi. Namun nilai *overshoot* dan osilasi masih dalam batas wajar dan masih bisa ditoleransi. Pada grafik respon temperatur diperoleh beberapa parameter, yaitu *rise time* (s), *peak time* (s), *overshoot* (%), *Steady State Error (Ess)* (%) dan *settling time*. Untuk *rise time* diperoleh sebesar 1,2374 detik, *peak time* pada 2 detik, *overshoot* sebesar 3,8278%, *Steady State Error* sebesar 0,0042% dan *settling time* pada 4,5143 detik. Semua nilai ini mempunyai pengaruh pada seberapa besar respon transien, semakin besar nilai *rise time*, *peak time* dan *settling time* berarti semakin lama pula responnya, begitu juga sebaliknya.

Respon Nilai error

Nilai *error* adalah nilai selisih dari nilai *setpoint* dan nilai bacaan *feedback* dari sistem, dalam hal ini nilai *error* yang terjadi adalah besaran selisih suhu antara suhu target (*setpoint*) dengan suhu dari sistem pemanas. Besaran nilai ini yang menentukan berapa nilai *output* dari kontroler PID pada aktuatur untuk mendapat nilai sesuai *setpoint*. Besaran nilai *error* pada simulasi sistem ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Nilai *error* pada kolam hidroterapi

Berdasarkan grafik pada Gambar 9, nilai *error* pada sistem naik hingga 5°C pada awal simulasi sebelum mengalami penurunan secara perlahan hingga nilai *error* mendekati 0°C. Pada awal simulasi nilai *error* sangat besar karena sistem baru mulai membaca suhu dari kondisi 27°C (suhu air normal). Sistem kontrol PID terbukti dapat menekan nilai *error* pada saat simulasi hingga mendekati 0, dimana nilai *error* tersebut baru tercapai pada kisaran 15 detik. Semakin lamanya waktu yang dibutuhkan kontroler untuk menekan nilai *error* hingga mendekati 0 berarti waktu respon sistem untuk mencapai suhu target akan lebih lama.

Display Panel Program PLC Dan HMI (Logic Panel)

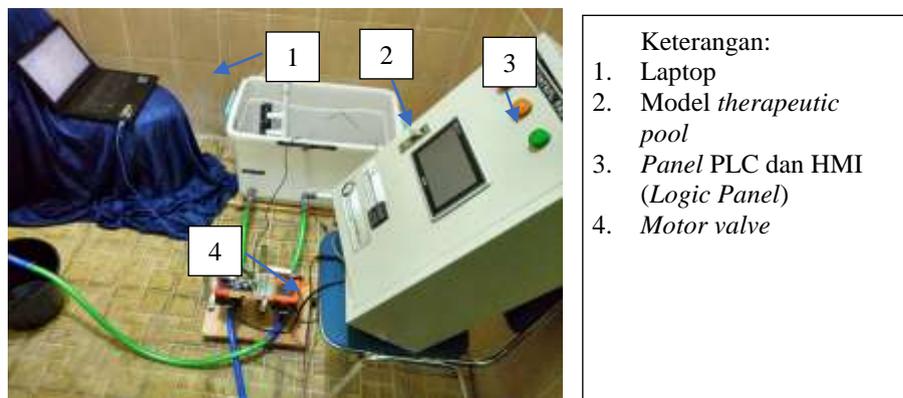
Proses simulasi PLC dan HMI pada sistem *evacuated tube solar water heater* untuk model *therapeutic pool* dibagi menjadi tiga bagian, yaitu proses *collecting*, proses *circulating*, dan terakhir proses *mixing*. *Software* yang digunakan simulasi program PLC dan HMI yaitu *software* smartstudio untuk membuat program *ladder* pada PLC dan *software* GP editor untuk membuat desain pada *display panel* HMI. Gambar 10 merupakan tampilan *display panel* pada HMI.



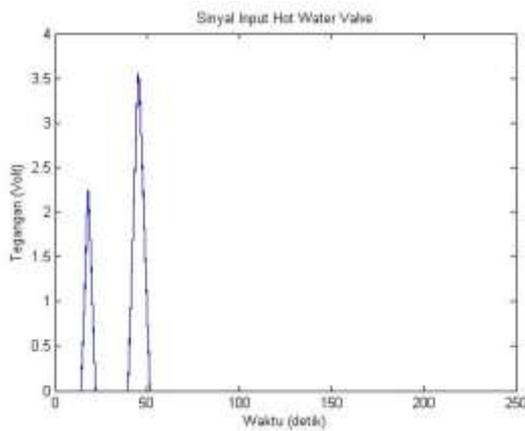
Gambar 10. *Display panel* pada HMI untuk, a) Proses *Collecting*, b) Proses *Circulating*, c) Mode level air, d) Proses *mixing*

Kinerja Sistem *Evacuated Tube Solar Water Heater* untuk Model *Therapeutic Pool*

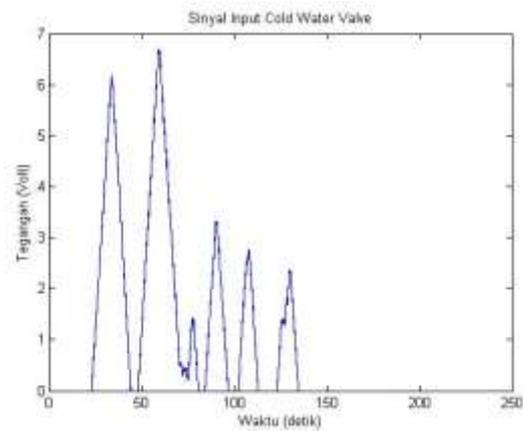
Untuk kinerja sistem *evacuated tube solar water heater* pada model *therapeutic pool* dilakukan proses pengambilan data temperatur secara aktual. Pengambilan data temperatur aktual dilakukan pada proses *mixing*. Untuk pengambilan data temperatur aktual pada proses *mixing*, kolam *therapeutic pool* yang digunakan berupa model dan ketinggian level air yang digunakan adalah mode level 1. Pada pengambilan data, pembacaan temperatur menggunakan *thermocouple* dan aktuator berupa *motorized valve* yang diatur oleh PLC dan *thermocontroller* TK4S14-CC sebagai kontroler. Untuk *motorized valve* diletakan di dua tempat, yaitu pada *output air hot water storage (HWS)*, *output air cold water storage (CWS)*, dan untuk proses *drain* pada kolam digunakan *selenoide valve*. Proses pengambilan data temperatur pada proses *mixing* ditunjukkan pada Gambar 11, sedangkan pengambilan data *signal analog (PID system)* untuk *hot water valve* dan *cold water valve* dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13, kemudian data temperatur untuk proses *mixing* hasilnya dapat dilihat dalam bentuk grafik pada Gambar 14.



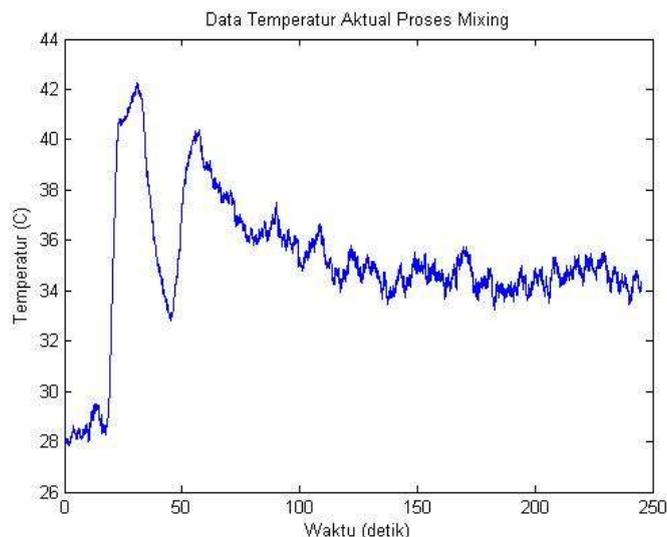
Gambar 11. Setup proses *mixing*



Gambar 12. *Signal analog PID system* pada proses *mixing Hot Water Valve*



Gambar 13. *Signal analog PID system* pada proses *mixing Cold Water Valve*



Gambar 14. Grafik temperatur data aktual pada proses *mixing*

Pada Gambar 11, 12, 13 dan 14, ditunjukkan bahwa pengambilan data dilakukan selama 250 detik. Temperatur pada kolam (*therapeutic pool*) naik signifikan dari temperatur lingkungan sebesar 28 °C hingga temperatur maksimum 42 °C ketika proses *mixing* mulai bekerja, kemudian turun secara cepat mencapai temperatur rata-rata ± 34 °C. Kenaikan temperatur pada kolam disebabkan proses *mixing* air panas dari *hot water storage* (HWS) temperatur ± 77 °C dengan air dingin dari *cold water storage* (CWS) temperatur ± 28 °C, sehingga temperatur di dalam kolam naik sampai temperatur 42 °C. Proses *mixing* bekerja ketika adanya perintah dari PLC dengan menekan tombol ON pada proses “*Start Therapy*” di *interface* HMI, sehingga *motor valve* pada HWS dan CWS menyala untuk mengkondisikan supaya temperature dan ketinggian air pada kolam mencapai *set value*. Apabila *set value* temperatur sudah tercapai namun *set value level* belum tercapai maka *valve drain* akan membuka selama 5 detik sehingga temperatur turun dan proses *mixing* dapat dilanjutkan. Setelah mendapatkan ketinggian air dan temperatur sesuai dengan *set value*, maka *motor valve* pada HWS dan CWS berhenti otomatis.

Dalam pengujian ini, karena temperatur air dalam kolam maksimal mencapai 42 °C, maka aktuator yang bekerja yaitu *motor valve* pada CWS dan *drain*. Air dingin pada CWS akan masuk ke dalam kolam untuk mendinginkan temperatur kolam sampai mendapatkan *set value* temperatur *therapeutic pool*, dan proses *drain* berfungsi untuk menjaga ketinggian *level* air pada kolam agar ketinggian air pada kolam tetap terjaga sesuai *set value*. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 14, dimana temperatur 42 °C mengalami penurunan cepat mencapai temperatur ± 34 °C. Kemudian naik lagi hingga 40 °C lalu temperatur turun perlahan sampai temperatur di dalam kolam mencapai temperatur *set value therapeutic pool* ± 34 °C. Setelah mendapatkan temperatur *therapeutic pool*, maka *motor valve* pada CWS dan *drain* berhenti secara otomatis.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan terhadap sistem *indirect evacuated tube solar water heater* untuk model *therapeutic pool*, maka dapat menarik beberapa kesimpulan bahwa sistem *indirect evacuated tube solar water heater* pada *therapeutic pool* untuk menghasilkan air panas berhasil dirancang dengan kapasitas air panas 234 liter/jam untuk temperatur *set value* pada proses *collecting* sebesar 70 °C. Untuk memudahkan operasional, dibuat program PLC dan HMI pada sistem *indirect evacuated tube solar water heater* pada *therapeutic pool* dengan proses *collecting*, *circulating*, dan *mixing*. Berdasarkan hasil pengujian PID system pada proses *mixing* untuk model *therapeutic pool*, berhasil mendapatkan temperatur untuk proses terapi yaitu ± 33 °C dan stabil pada detik ke 10, dimana acuan temperatur untuk *therapeutic pool* sendiri 31°-34 °C.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bartoli, F dkk. 2013. Depression after Stroke and Risk of Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Stroke Research and Treatment*. Article ID 862978, 11 pages.
- [2] Khairatunnisa, Sari, Dian Maya. 2017. Faktor Risiko yang Berhubungan dengan Kejadian Stroke pada Pasien di RSUH. Sahudin Kutacane Kabupaten Aceh Tenggara. *Jumantik*: 2 (1)
- [3] Departemen Kesehatan Republik Indonesia. 2014. Laporan Hasil Riset Kesehatan Dasar Indonesia (Riskesdas).
- [4] Kusumaastuti, P., 2008. Hidroterapi, Pulihkan Otot dan Sendi yang Kaku, <http://www.gayahidupsehat.com>. Diakses jumat, 10 april 2015.
- [5] Christine, S. (2012). “*Hydrotherapy Helps Survivors Regain Strength and Mobility*”. Tersedia dari: <http://www.Stroke-Network.com>, [Dikutip: 10 April 2020].
- [6] Morrison, G.L., Budihardjo., M. Behina. 2003. Water-in-glass evacuated tube solar water heaters. Sydney: Universitas of new south wales.
- [7] Yuhendri, D. 2018. Penggunaan PLC Sebagai Pengontrol Peralatan Building Automatis *Journal of Electrical Technology*: 3 (3).
- [8] Sateesha, P., Patel, S., Vavhal, P., Rahate, H. 2018. Design & Development of Tube in Tube Helical Coil Heat Exchanger. *Int. Res. J. of Science & Engineering*.
- [9] Kruthiventi, S.S Rasu, N. G., Sai Sarath Kruthiventi and Rao, Y.V.H. 2018. Coiled Tube Heat Exchangers - A Review. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*: 9 (1) hal. 895–904.
- [10] Mahmood, J.R., Selman., N.H. 2016. Four MATLAB-Simulink models of photovoltaic system. *International Journal Of Energy And Environment*: 7 (5) hal. 417-426.
- [11] Bansal, H.O., Sharma, R., Shreeraman, P.R. 2012. PID Controller Tuning Techniques: A Review. *Journal of Control Engineering and Technology (JCET)* : 2 (4) hal. 168-176.
- [12] Han, Y., Feng1, Y., Lou, H., Zhang, X. 2018. Thermocouple-based Temperature Sensing System for Chemical Cell Inside Micro UAV Device. *Journal of Physics: Conf. Series* 986.