

Rancang Bangun Sistem Pengendalian Temperatur pada Boiler Menggunakan PID dan *Fuzzy Logic Controller*

Fatah Raditya¹, Erna Kusuma Wati¹, Ucu Darusalam¹, Eddy Ariffin¹

¹Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Nasional, Jakarta 12520

fatahraditya@yahoo.com, ernakusuma.w@gmail.com

ABSTRAK. Kendali PID konvensional banyak digunakan pada beberapa industri sebagai aplikasi kendalinya karena kesederhanaannya dan ketahanannya. Parameter proses di beberapa industri dapat berubah-ubah bergantung pada perubahan lingkungan sekitar proses. Parameter ini dapat dikategorikan sebagai *steam*, *pressure* dan temperatur dari alat-alat industri yang digunakan. Berbagai teknik kendali proses sedang dikembangkan untuk mengontrol variabel ini. Pada penelitian ini parameter aliran *steam* pada boiler dikendalikan menggunakan pengendali PID, *Fuzzy Logic Controller* (FLC) dan kemudian dioptimalkan menggunakan pengendali Fuzzy-PID. Hasil perbandingan menunjukkan jika menggunakan pengendali PID *overshoot* yang terukur 52,28%, sedangkan dengan FLC terukur 1,74% dan dengan pengendali Fuzzy-PID tercatat 9,93%. *Setting time* untuk pengendali PID terukur 31s, pada FLC 67s dan pada pengendali Fuzzy-PID 49s. Hasil perancangan sistem menggunakan algoritma pengendali Fuzzy-PID menunjukkan hasil respon pengendalian yang lebih baik dari mode pengendali PID ataupun FLC.

Kata Kunci: Pengendalian, Boiler, PID, *Fuzzy Logic*, Temperatur

PENDAHULUAN

Boiler adalah bejana tertutup dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk air panas (*steam*) yang bersuhu sekitar 2500-3000°F. *Steam* pada tekanan tertentu kemudian digunakan untuk mengalirkan panas ke suatu proses untuk membangkitkan energi. Permasalahan yang timbul pada *plant* adalah sistem pengendalian sebelumnya memiliki respon yang lambat, sehingga berpengaruh terhadap input yang diberikan dengan hasil *output* dari *boiler* dan *steam* yang dihasilkan dari *boiler* ini tidak sesuai dengan *set point* yang telah diinginkan oleh operator.

Steam Boiler merupakan unit operasi pada suatu *plant* yang berperan penting dalam menghasilkan *steam*. Bervariasinya kuantitas kebutuhan pada *plant* tentunya menjadi beban bagi *boiler* sebagai alat utama penghasil *steam*. Beberapa penelitian yang menjadi referensi adalah penelitian yang dilakukan oleh S. Subramanian dengan judul “*Fuzzy Predictive Control for Intelligent Soot Blowing*”, peneliti merancang aplikasi blowing pada unit Captive Chemical Recovery High Pressure Cogeneration. Kendali prediksi yang diusulkan menggunakan karakteristik *fuzzy* dari tujuan dan kendala, didasarkan pada kerangka optimasi *fuzzy* untuk multi tujuan masalah kepuasan. Penelitian oleh Cheung-Chieh Ku, Pei-Hwa Huang, and Wen-Jer Chang dengan judul “*Passive Fuzzy Controller Design For Perturbed Nonlinear Drum-Boiler System With Multiplicative Noise*”, peneliti merancang *robust passive fuzzy controller* untuk sistem *drum-boiler* yang ketidaklinearannya sangat kuat dengan *multiplicative noise*.

Pada penelitian ini model *fuzzy* Takagi-Sugeno (TS) digunakan untuk mewakili sistem boiler yang nonlinear menjadi sistem yang dapat dianalisa. Disertasi yang dilakukan oleh S. Samyukth, P. Kanagasabapathy dengan judul “*Optimized Fuzzy Modelling Of A Boiler Superheater*”, peneliti memodelkan sistem yang sangat berguna untuk mempelajari respon sistem untuk variasi input yang berbeda dan untuk desain skema control di kedua aplikasi *real time* dan dalam simulasi *off-line*. Pengembangan model *fuzzy* dioptimalkan untuk boiler superheater pembangkit listrik dengan bahan bakar batubara boiler termal dan kapasitas produksi 210 MW [1]-[3].

Tujuan dari penelitian ini adalah peneliti mampu mengatasi permasalahan yang timbul pada pengendalian temperatur pada sistem di PT. Pertamina UP IV Cilacap serta mendapatkan sistem

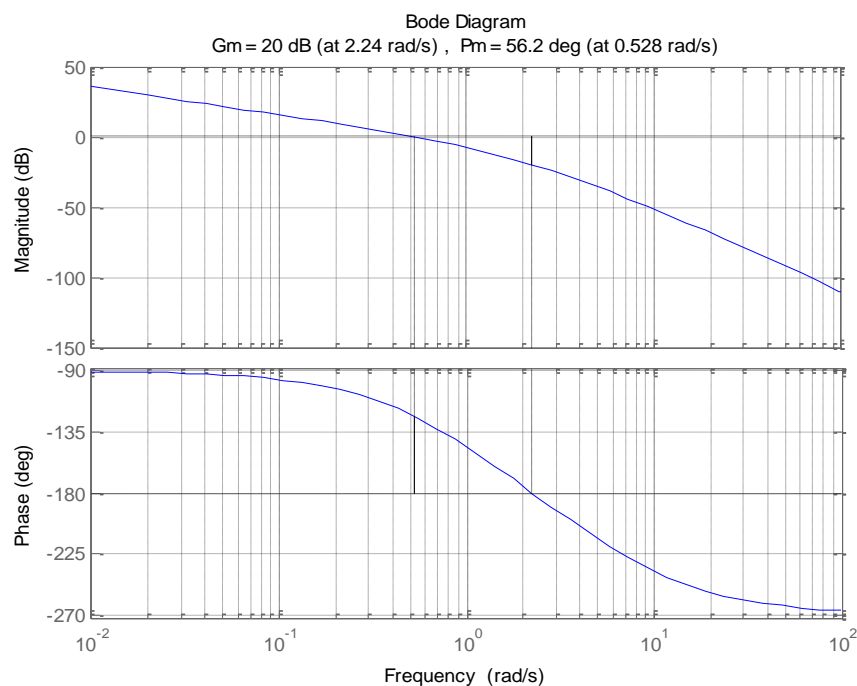
pengendalian temperatur yang tepat pada sistem *boiler* di PT. Pertamina UP IV Cilacap. Adapun manfaat yang diharapkan pada penelitian ini adalah dengan dihasilkannya perancangan kendali temperatur pada *boiler* ini, maka dapat dipastikan pengendalian temperatur pada *boiler* di PT. Pertamina UP IV Cilacap akan stabil serta tetap optimal.

METODE PENELITIAN

Pemodelan Sistem Temperatur pada Boiler

Ketel uap adalah salah satu pesawat uap yang dibuat untuk menghasilkan uap dan dipergunakan di luar pesawatnya. Uap diperoleh dengan cara memanasi air yang berada dalam drum atau tubes *boiler* pada suhu tertentu dengan menggunakan alat pemanas yang disebut *burner*. Sebuah *boiler* dari *plant* pabrik kimia diambil contohnya sebagai studi kasus pada penelitian ini, dengan mengontrol temperature pada *boiler* tersebut dengan menggunakan pengendali PID dan pengendali *Fuzzy* diharapkan *steam* yang dihasilkan sesuai dengan *set point* yang telah ditentukan. Pada *boiler* tersebut set point untuk pengendalian temperatur agar *output* yang dihasilkan sesuai dengan yang dibutuhkan adalah sebesar 450°C [4]. Melalui software Matlab fungsi transfer dengan plot diagram bode dari persamaan (1) ditunjukkan pada gambar 1.

$$G(s) = \frac{3s+5}{s^3+6s^2+5s} \quad (1)$$



GAMBAR 1. Diagram Bode dari Sistem Boiler.

Perancangan kendali PID

Algoritma PID adalah kendali umpan balik yang mudah dipahami algoritmanya serta dapat memberikan kinerja control yang sangat baik meskipun *plant* proses memiliki karakteristik yang dinamik serta beragam. Representasi matematis dari algoritma iniditunjukkan oleh persamaan (2).

$$\frac{mv(s)}{e(s)} = k_c \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right] \quad (2)$$

Apabila diinginkan respon proses dari pengendalian aliran *steam* pada *boiler* tidak beresilasi, maka dapat digunakan mode *Proporsional Integral Derivatif* (PID) karena mode kendali ini dapat membuat respon proses pengendalian aliran *steam* pada *boiler* menuju *set point* secara

ekponensial. Secara matematis mode kendali PID ini dapat dituliskan sebagai berikut : nilai k_p menyatakan kepekaan *proporsional*, T_i menyatakan waktu *integral* dan T_D menyatakan waktu *derivative*. Kendali PID pada dasarnya sangat cocok untuk orde kedua atau lebih kecil dari itu. Kendali ini juga bisa digunakan pada *plant* yang memiliki orde tinggi dengan urutan perilaku domain kedua. Metode *Ziegler-Nichols (ZN)* bergantung pada respon *loop* terbuka, *step* respon atau *loop* tertutup tes respon frekuensi. Sebuah kendali PID disetting menurut sebuah tabel berdasarkan proses tes respon [5]. Sesuai dengan tabel frekuensi dari *ZN* didapat nilai k_p , T_i dan T_D sebagai berikut:

$$k_p = 0,6 k_c, T_i = 0,5 T \text{ dan } T_D = 0,125 T$$

dimana nilai $k_c = 30$ dan $T = 2,69$, maka didapatkan nilai parameter PID dari pengendali *steam* pada *boiler* sebagai berikut:

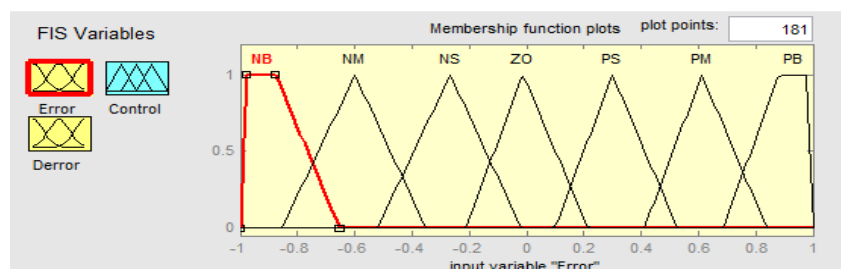
$$k_p = 32, T_i = 1,5 \text{ dan } T_D = 0,29$$

$$P = 30, I = 21,2 \text{ dan } D = 9$$

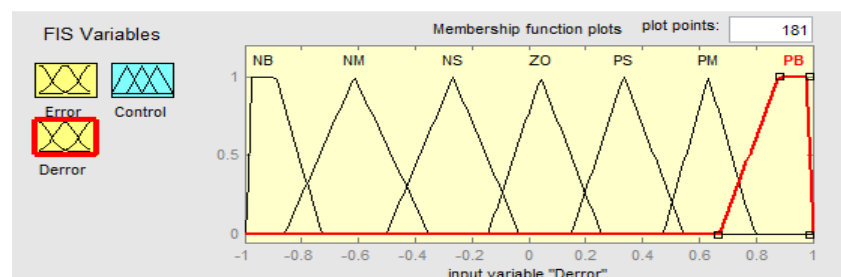
Perancangan kendali logika Fuzzy

Perancangan kendali logika *fuzzy* tidak memerlukan penurunan model matematis dari sistem untuk merepresentasikan hubungan numerik *input – output*, tetapi didasarkan pada hubungan *input – output* yang dinyatakan dengan bahasa natural manusia dari operator. Kendali logika *fuzzy* yang digunakan bersifat statik dimana fungsi keanggotaannya mempunyai rentang yang tetap.

Fuzzifikasi adalah proses memetakan input output dari variabel *crisp* ke dalam variabel linguistik. Dengan menyederhanakan respon hasil pengeplotan hubungan antara *error*, *delta error*, sinyal kendali maka dapat dibuat daerah range tertentu sesuai design kita untuk kemudian dibentuk himpunan *fuzzy* yang didefinisikan dalam variabel linguistik seperti NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB. Untuk mendefinisikan nilai variabel linguistik digunakan fungsi keanggotaan (*membership function*). Dalam pemilihan fungsi keanggotaan himpunan *fuzzy* tidak ada aturan yang baku, tapi pemilihan fungsi keanggotaan harus merepresentasikan karakteristik himpunan *fuzzy* yang kita inginkan [1-3].



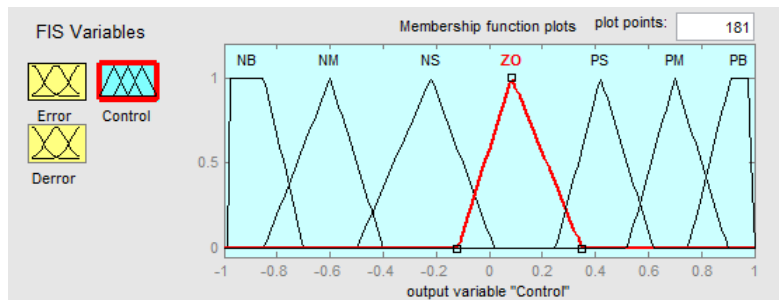
GAMBAR 2. Fungsi keanggotaan dari error untuk aksi.



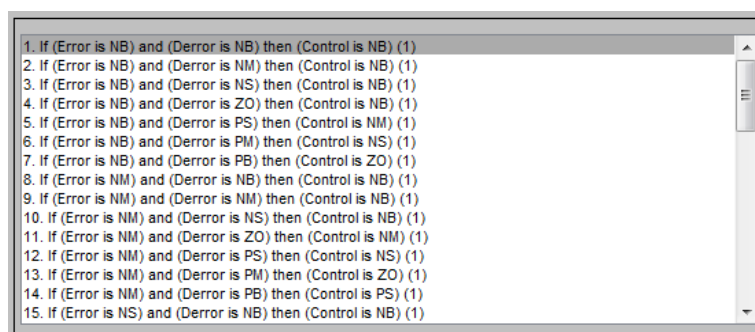
GAMBAR 3. Fungsi keanggotaan dari delta error untuk aksi.

Pada penelitian ini dipilih untuk kendali logika *fuzzy* aksi fungsi keanggotaan *gaussian* dan *trapesoide*. Penentuan fungsi keanggotaan didapat dari model matematis system temperature

pada boiler, dengan tujuh fungsi keanggotaan dan menggunakan metode triangular sebagai fungsinya. Fuzzifikasi ditunjukkan pada Gambar 2 - Gambar 4. Rules yang digunakan pada pengendalian fuzzy sebagai kendali temperatur pada boiler dengan tujuh fungsi keanggotaan, sehingga memiliki 7^2 atau 49 rules, yang ditunjukkan pada gambar 5.



GAMBAR 4. Fungsi keanggotaan dari sinyal kendali untuk aksi.



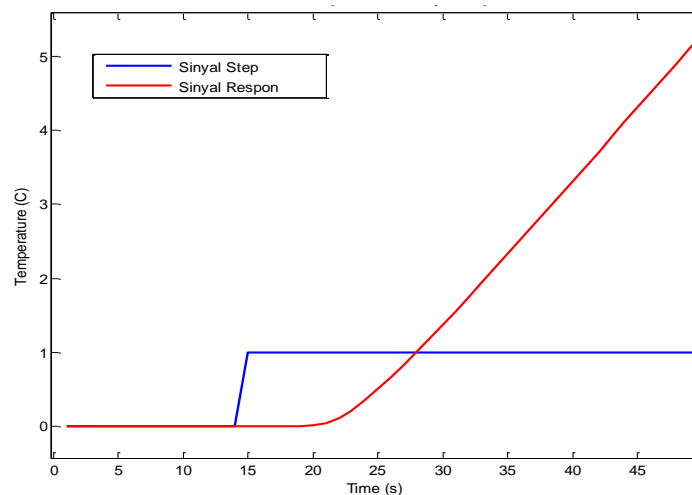
GAMBAR 5. Matrik aturan fuzzy.

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Setelah penentuan model matematik *plant* pada boiler, maka dilakukan perancangan untuk mengendalikan temperatur *steam* pada boiler. Dengan memasukkan variable – variable yang telah didapatkan sebelumnya, maka dapat dirancang sebuah kendalier pada aliran *steam* pada boiler.

Pengujian Respon Sinyal Sistem Open Loop

Setelah didapatkan model matematis dari *plant boiler*, maka selanjutnya untuk mengetahui respon dari sistem tersebut, dilakukan simulasi menggunakan software Matlab ditunjukan pada Gambar 6.

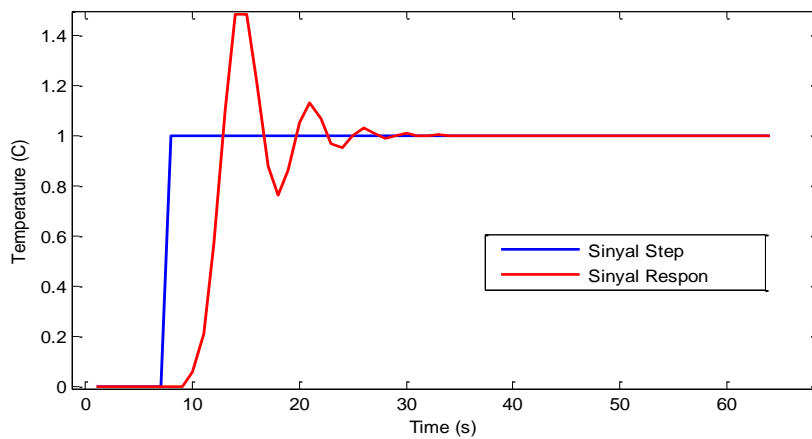


GAMBAR 6. Grafik Respon Sistem dengan input Sinyal Step

Simulasi pada *open loop* ini digunakan untuk mengetahui sejauh mana performansi sistem tanpa bantuan pengendali. Uji *open loop* dilakukan dengan memberikan input sinyal *step*. Pada gambar diatas menunjukkan bahwa dengan adanya uji *open loop* tanpa bantuan pengendalian apapun, temperatur tidak bisa mencapai *set point*. Karena performansi sistem tersebut jauh dari yang diinginkan, karena karakteristik *plant* termasuk dalam orde dua dan tidak dapat mengendalikan dirinya sendiri ketika tidak dipasang alat-alat pengendali.

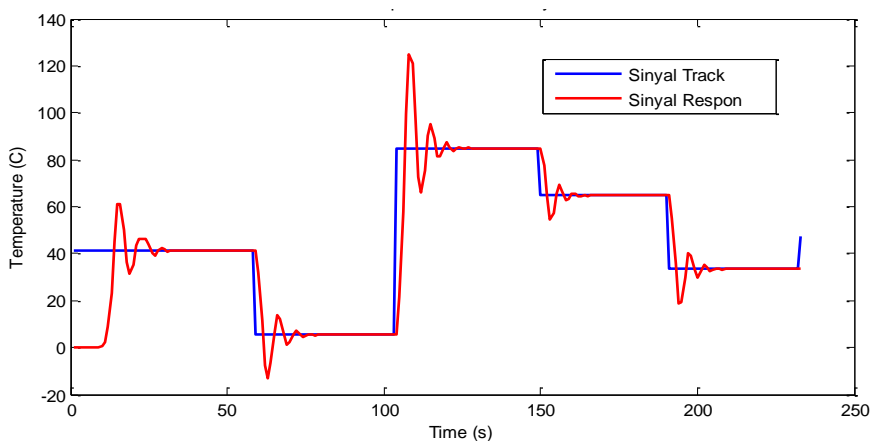
Perancangan Kendali PID

Dari perhitungan sebelumnya telah didapat konstanta pengendali PID yaitu nilai $k_p = 32$, $T_i = 1,5$ dan $T_D = 0,29$, maka tahap pemasangan kendali PID dilanjutkan dengan tahap perancangan kendalier. Gambar 7 merupakan hasil perancangan kendalier PID pada *plant boiler*.



GAMBAR 7. Grafik Respon Kendali PID dengan input Sinyal Step

Berikutnya akan dilakukan uji *close loop* sistem dengan pengendali PID. Dimana pada bab sebelumnya telah diketahui nilai *gain* dari pengendali PID. Nilai *gain* inilah yang dimasukkan ke dalam pengendali PID pada *software* simulink *Matlab* untuk mengetahui respon sistemnya terhadap beberapa sinyal uji yang telah diberikan. Dimulai dengan sinyal uji *step*, dimana dapat dilihat pada grafik diatas bahwa respon dari sistem pengendali PID dapat mencapai *set point* yang telah ditentukan. Dimana hasilnya respon yang diperoleh telah mendekati *set point* dan pengendali PID dapat digunakan untuk mengendalikan temperatur pada *boiler* dengan nilai *maximum overshoot* dan *settling time* sebesar 52,28% dan 31 s.



GAMBAR 8. Grafik respon kendali PID input sinyal tracking.

Simulasi pada sistem temperatur dengan pengendali PID berikutnya diuji dengan input sinyal *track* yaitu sinyal yang telah disetting berubah-ubah. Dan hasil yang didapat dari respon tersebut ditunjukkan pada grafik diatas, dimana pengendali dapat merespon dengan sangat baik input yang berubah-ubah tersebut. Nilai *overshoot* yang dihasilkan pada pengujian sinyal *track* didapat 19,9% dan untuk mencapai *set point* waktu yang dibutuhkan selama 33s.

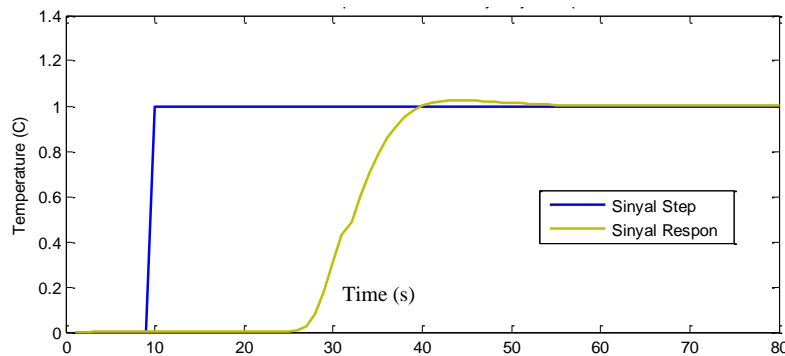
TABEL 1. Perbandingan Uji Sinyal input pada PID Controller

PID Controller	Sinyal Step	Sinyal Ramp	Sinyal Kontinu	Sinyal Pulse	Sinyal Track
Maximum Overshoot	52,28 %	30,5 %	23,46 %	16,37 %	19,9 %
Settling Time	31 s	44,3 s	48 s	∞	33 s

Dapat disimpulkan melalui tabel 1 bahwa untuk mode pengendali PID telah dapat mencapai *set point* yang telah diberikan dengan berbagai macam sinyal uji. Untuk sinyal uji *step* terjadi *maximum overshoot* dan *settling time* yang cukup tinggi yaitu sebesar 52,28 % dan 31 s. Jika pada pengujian sinyal *ramp* respon pengendali untuk mencapai *steady state* paling lama diantara sinyal uji yang lain. Pada sinyal uji *pulse* ini nilai *maximum overshoot* telah cukup baik yaitu sebesar 16,37 % nilai ini adalah yang paling kecil dibandingkan dengan respon yang dihasilkan dari sinyal uji yang lain. Pada sinyal uji kontinu *overshoot* yang terjadi sebesar 23,46 % nilai ini cukup baik dari sinyal uji sebelumnya, serta pengendali memperbaiki *settling time* sebesar 48 s, sedikit demi sedikit pengendali PID memperbaiki outputan yang dihasilkan. Dan terakhir pada sinyal uji *track* didapatkan nilai *maximum overshoot* sebesar 19,9 % dan *settling timenya* 33 s, nilai ini adalah nilai yang paling baik yang dihasilkan dari pengendali PID dalam hal pencapaian *steady state*.

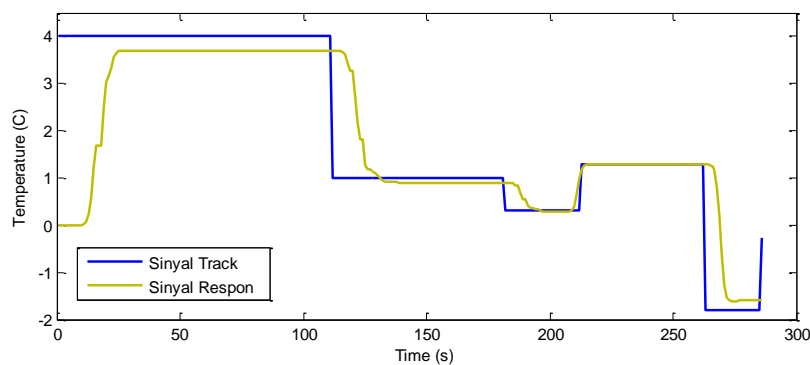
Perancangan Kendali Fuzzy

Gambar 9 merupakan respon hasil perancangan kendalier *Fuzzy* pada *plant boiler*.



GAMBAR 9. Grafik respon pengendali *fuzzy* input sinyal step.

Selanjutnya dilakukan uji *close loop* sistem dengan *Fuzzy Logic Controller*. Dimana pada bab sebelumnya telah dirancang fungsi keanggotaan *Fuzzy* dengan tujuh variable dan 49 *rules*. Dan desain pengendalian tersebut akan dilakukan pengujian dengan sinyal yang berbeda-beda. Pertama pengendalian diuji dengan input sinyal *step*, hasil respon dapat dilihat pada Gambar 10, respon sistem terhadap sinyal uji cukup baik yaitu sinyal outputan dapat mencapai *set point* yang telah ditentukan. Untuk respon *fuzzy* pada sinyal uji ini mengalami *overshoot* mencapai 1,74 % dan *settling time* sebesar 67 s.



GAMBAR 10. Grafik respon kendali *fuzzy* input sinyal tracking.

Pada pengujian ini dilakukan pengujian pengendali *fuzzy* terhadap perubahan *set point* pada proses dengan memberikan uji *set point* naik dan sekaligus *set point* turun. Grafik respon

sistem dapat dilihat pada gambar diatas. Untuk respon *Fuzzy Logic Controller* pada kenaikan *set point* awal mengalami *maximum overshoot* mencapai 1,74 % dan *settling time* sebesar 28 s, dengan nilai tersebut cukup aman untuk mengendalikan temperatur. Jika dibandingkan dengan *PID controller* yang membahayakan terhadap pengendalian temperatur dengan *overshoot* yang cukup tinggi akan mengakibatkan tekanan yang tinggi juga dan dapat membocorkan pipa jika terjadi terus menerus.

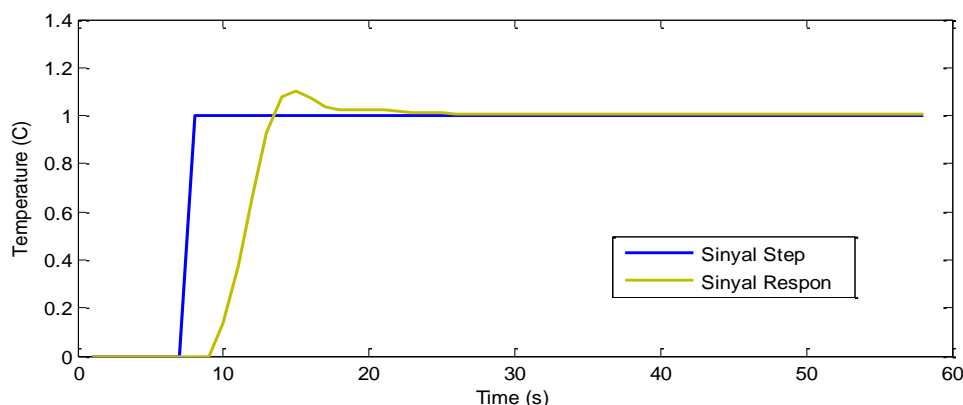
TABEL 2. Perbandingan Uji sinyal input pada fuzzy logic controller.

Fuzzy Logic Controller	Sinyal Step	Sinyal Ramp	Sinyal Kontinu	Sinyal Pulse	Sinyal Track
Maximum Overshoot	1,74 %	∞	∞	∞	1,74 %
Settling Time	67 s	∞	43 s	38 s	28 s

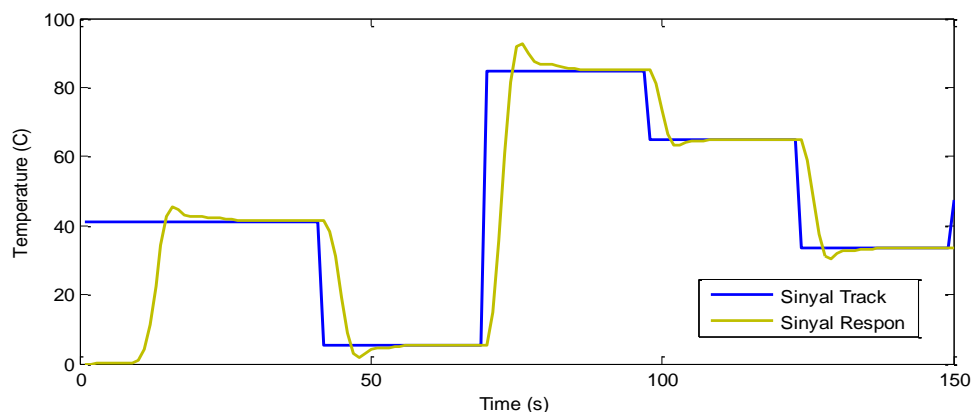
Melalui tabel 2 dapat disimpulkan bahwa untuk mode *Fuzzy Logic Controller* telah dapat mencapai nilai *set point* yang telah ditentukan meskipun pada beberapa sinyal uji ada yang tidak dapat mencapai *set point*. Tetapi secara keseluruhan respon yang dihasilkan pada beberapa pengujian tersebut hasilnya cukup baik. Tidak dapat dipungkiri lagi bahwa kelemahan dari *Fuzzy Logic Controller* adalah *settling time* tetapi kelebihan yang paling baik dari pengendali ini adalah *overshoot* yang sangat kecil jika dibandingkan dengan pengendali PID.

Perancangan Kendali Fuzzy- PID

Dari perancangan 2 (dua) pengendali sebelumnya, telah didapat respon masing-masing pengendali. Maka jika kendalier tersebut digabung akan dihasilkan respon pada sistem boiler pada gambar 11.



GAMBAR 11. Grafik respon pengendali *fuzzy*-PID input sinyal step.



GAMBAR 12. Grafik respon kendali *fuzzy*-PID input sinyal tracking.

Pada uji kali ini dilakukan terhadap sistem dengan pengendali *fuzzy*-PID, yang mana nilai *gain* dari pengendalian *Fuzzy* digunakan untuk menentukan *gain* dari pengendalian PID. Dan dihasilkan nilai k_p , k_i , dan k_d sebesar 6,3 ; 0,25 ; 1,25 ; 5,3 nilai-nilai *gain* tersebut yang

nantinya akan dimasukkan ke pengendalian PID pada simulink *Matlab* dan dilakukan uji sinyal input dengan berbagai bentuk. Berikut sistem akan diuji dengan input sinyal *step*, dan hasilnya dapat dilihat dari grafik diatas yang menunjukkan respon dari sistem dapat mencapai *set point* yang ditentukan. Hasil ini lebih baik dari pengendali PID sebelumnya. Dan didapat nilai *maximum overshoot* sebesar 9,93 % dan *settling time* sebesar 49s.

Grafik pada gambar 12 adalah hasil dari pengendalian *Fuzzy-PID* yang telah diuji dengan input sinyal *track* (dengan mengubah-ubah *set point*) yang telah diberikan, dan hasilnya dapat dilihat bagaimana pengendali tersebut cukup bagus dalam merespon setiap perubahan *set point* yang diberikan. Hal ini menandakan bahwa sistem pengendali *Fuzzy-PID* ini sangat cocok jika diterapkan dalam pengendalian temperatur pada *boiler*. Dengan *overshoot* hanya sebesar 10,68 % dan *settling time* sebesar 29 s. Pengendali ini diharapkan dapat membantu operator untuk mendapatkan outputan produk yang sangat baik. Hasil pengendalian tersebut dibandingkan pada tabel 3.

TABEL 3. Perbandingan Uji Sinyal input pada Fuzzy - PID Controller

Fuzzy-PID Logic Controller	Sinyal Step	Sinyal Ramp	Sinyal Kontinu	Sinyal Pulse	Sinyal Track
Maximum Overshoot	9,93 %	17,9 %	15,2 %	10,15 %	10,68 %
Settling Time	49 s	21 s	33 s	16 s	29 s

Dengan melihat tabel 3 maka dapat disimpulkan bahwa pengendalian *Fuzzy-PID* ini sangat cocok dengan sistem pengendalian temperatur pada *boiler*. Dimana dari hasil uji sinyal *step* didapat nilai *maximum overshoot* sebesar 9,93 % dan *settling time* sebesar 49 s. Dan jika pada sinyal uji *ramp* sistem pengendali juga cukup baik merespon *set point* yang diberikan dengan *overshoot* sebesar 17,9 % dan *settling time* sebesar 21 s, untuk sinyal uji yang lain yaitu berupa sinyal *pulse* nilai *overshoot* dapat diredam sebesar 10,15 % dan *settling time* sebesar 16 s. Jika membahas sinyal uji kontinu pengendalian dengan *Fuzzy-PID* juga tidak kalah bagus dengan dua pengendalian PID *controller* dan *Fuzzy Logic Controller*, dilihat dari nilai *overshoot* yang dihasilkan cukup kecil sebesar 15,2 % dan *settling timenya* 33 s . Dan yang terakhir pada pengujian sinyal yang berubah-ubah atau disebut juga sinyal *track* maka nilai *maximum overshoot* yang dihasilkan juga sangat baik sebesar 10,68 % dan *settling time* juga bagus sebesar 29 s.

TABEL 4. Perbandingan mode kendali

	PID Controler	Fuzzy Logic Controller	Fuzzy - PID Controller
Maximum Overshoot	52,28 %	1,74 %	9,93 %
Settling Time	31 s	67 s	49 s

Dari semua pengujian pengendali yang dibandingkan pada tabel 4, membuktikan bahwa pengendalian *Fuzzy-PID* masih dapat stabil dengan perubahan-perubahan yang ada. Dan ketika terjadi perubahan parameter pada *plant*, respon pengendalian *Fuzzy-PID* masih mampu menjaga kestabilan sistem. Ideal PID *controller* belum mampu lagi mengendalikan *plant* dengan baik, hal ini dilihat dari *overshoot* yang dihasilkan oleh pengendalian tersebut masih sangat tinggi ini sangat membahayakan jika diterapkan pada *plant*.

Sedangkan *Fuzzy Logic Controller* juga belum mampu merespon perubahan sinyal-sinyal yang telah diberikan dengan *settling time* yang sangat besar maka dibutuhkan waktu yang sangat lama untuk mencapai *steady state*. Akan tetapi jika menggunakan *Fuzzy-PID controller* yang menghitung ulang parameter PID berdasarkan kondisi *error* dan perubahan *error* yang terjadi. Hal ini membuktikan bahwa algoritma kendali *Fuzzy-PID controller* mempunyai kelebihan dibandingkan dengan algoritma PID biasa dan juga *Fuzzy Logic Controller*.

Adanya tambahan *Fuzzy* ini diharapkan pengendalian lebih responsive terhadap perubahan yang terjadi di *plant* (mampu melakukan *tuning* dengan perubahan *plant*), sehingga kestabilan sistem tetap terjaga. Agar sebuah proses bisa dikatakan *safe*, sistem pengendalian yang mengontrol proses harus *reliable* dan *adaptif* dalam mengikuti perubahan proses.

KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan pengendali PID telah mampu mengendalikan temperatur pada *boiler*, akan tetapi pengendalian ini masih mengalami kekurangan pada *overshoot* yang dihasilkan terlalu tinggi. Pengendalian *fuzzy* cukup baik dalam merespon perubahan *set point*, kelemahannya adalah *settling time* yang dihasilkan masih terlalu lama. Dengan menggabungkan kedua pengendalian PID dan *fuzzy* maka permasalahan yang timbul dapat teratasi sesuai kesetimbangan sistem yaitu *overshoot* dibawah 10 % serta *settling time* tidak lebih dari 60 detik. Dengan dilakukannya uji sinyal *tracking set point*, *fuzzy-PID controller* lebih bisa mengikuti *set point* dan mengalami *overshoot* yang kecil bila dibandingkan dengan mode PID *controller* biasa ataupun *fuzzy logic controller*. Sehingga dengan adanya tambahan *fuzzy* ini pengendalian lebih *responsive* terhadap perubahan yang terjadi di *plant* (mampu melakukan *tuning* dengan perubahan *plant*) sehingga kestabilan sistem tetap terjaga.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Xiao Wu, Jiong Shen, Yiguo Li, dan Kwang Y. Lee, *IFAC-Papers OnLine* **48**, 397-407 (2015).
- [2] D. Andone, I. Fagarasan, S.St. Iliescu, dan A. Hossu, *IFAC Proceedings Volumes* **40**, 141-146 (2007).
- [3] Chunhua Du, Shaoke Chen, dan Xiaoming Liang, *Procedia Engineering* **15**, 639-643 (2011).
- [4] Wen Tan, Jizhen Liu, Fang Fang, dan Yanqiao Chen, *ISA Transactions* **43**, 571-583 (2004).
- [5] F. Morilla, *IFAC Proceedings Volumes* **45**, 346-351 (2012).