

Pengaruh Perubahan Set Point pada Pengendali Fuzzy Logic untuk Pengendalian Suhu Mini Boiler

Bhakti Yudho Suprpto¹, Wahidin Wahab², dan Mgs. Abdus Salam³

^{1,3}Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya
Jl. Raya Palembang–Prabumulih km.32, Inderalaya, Ogan Ilir 30129

²Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Gedung GK Lantai 1, Fakultas Teknik, Kampus UI, Depok 16424
e-mail: bhakti_yudho@yahoo.com

Abstrak—Dalam penelitian ini dirancang sebuah sistem kendali suhu mini boiler menggunakan pengendali fuzzy untuk mengendalikan keran pengendali pemasukan bahan bakar. Mini boiler yang digunakan memiliki dimensi panjang 80 cm dan berdiameter 40 cm. Bahan bakar yang digunakan pada proses pembakaran berupa gas. Pengendali fuzzy terdiri dari empat model berbeda yang dirancang berdasarkan jumlah fungsi keanggotaan pada variabel suhu yakni tiga, lima, tujuh, dan sembilan. Variabel masukan yang digunakan yaitu variabel suhu dan variabel kesalahan. Sedangkan variabel keluaran adalah variabel keran. Terdapat dua jenis gangguan yang diberikan secara bergantian pada sistem kendali, yaitu gangguan dari kerja sistem dengan masukan yang diatur pada 125°C, dan gangguan berupa perubahan masukan. Pada gangguan pertama, pengendali fuzzy mampu mencapai nilai 125°C untuk semua model. Pada gangguan kedua masukan diubah menjadi 100°C, 125°C, dan 150°C. Pada masukan 125°C dan 150°C, pengendali fuzzy mampu mencapai set point untuk semua model. Sedangkan pada masukan 100°C, pengendali fuzzy mampu stabil pada titik 97.92°C untuk pengendali model kesatu dan pada titik 100°C untuk model yang lain.

Kata kunci: logika fuzzy, sistem kendali suhu mini boiler, set point, model, masukan

Abstract—In this research, a mini boiler temperature control system is designed by using fuzzy logic controller (FLC). The FLC controls the valve of the incoming fuel. The mini boiler is fueled by gas, has length of 80 cm and diameter of 40 cm. FLC is designed in four different models based on the number of membership function of the temperature variable, i.e., three, five, seven and nine membership functions. The input variables are “temperature” and “error”, and the output variable is “valve”. There are two types of disturbance given to the control system, the disturbance of the system working at set point 125°C, and disturbance by changing the set point values. In the first type, the FLC is able to reach 125°C for all models. In the second type, the set points are varied to 100°C, 125°C, and 150°C. At set point 125°C and 150°C, the FLC is able to achieve the pre-determined set points for all models. Mean while at set point 100°C, the FLC can stabilized the system at point of 97.92°C for the first model, and at the point of 100°C for other models.

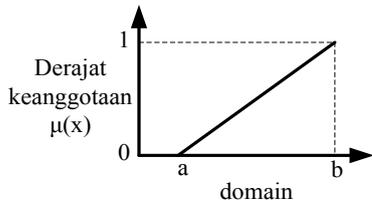
Keywords: fuzzy logic, mini boiler temperature control system, set point, model, input

I. PENDAHULUAN

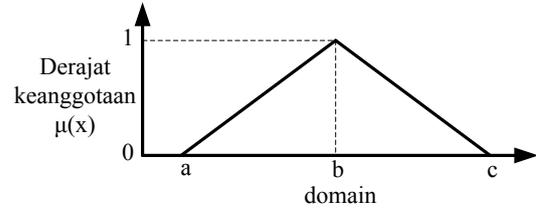
Penggunaan boiler dalam dunia industri sangat penting terutama untuk proses-proses yang memerlukan uap dari boiler misalnya untuk pemanasan, maupun untuk pembangkit tenaga uap. Dinamika pada pembangkit listrik merupakan proses yang non-linear dengan berbagai ketidakpastian. Namun demikian, tidak ada model matematika yang persis dapat menggambarkan sebuah proses fisik yang rumit yang penuh dinamika serta ketidakpastian. Selain itu, untuk pemodelan dinamika plant yang rinci, sintesa prinsip kontrolnya sering tidak efisien untuk dilakukan [1]. Disamping industri besar, boiler juga banyak dipergunakan pada industri rumah

tannga seperti pada industri pembuatan susu kedelai tentunya dalam bentuk mini boiler. Dalam aplikasinya sebuah boiler yang bekerja memerlukan media fluida cair untuk diubah ke bentuk fluida gas, namun untuk memenuhi kebutuhan fluida cair diperlukan suatu pengendali yang dapat membantu menyediakan fluida cair untuk dapat diproses ke dalam boiler.

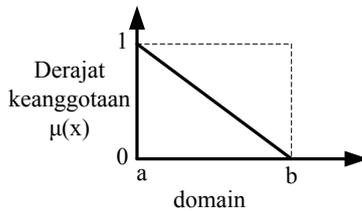
Sebuah model boiler bekerja berdasarkan prinsip keseimbangan energi, keseimbangan massa dan volume yang diturunkan untuk mendapatkan parameter yang dibutuhkan model tersebut [2]. Boiler yang dipergunakan pada penelitian ini adalah sebuah mini boiler atau boiler sederhana (skala lab) yang memanfaatkan gas sebagai bahan bakar pada proses pemanasan. Boiler ini



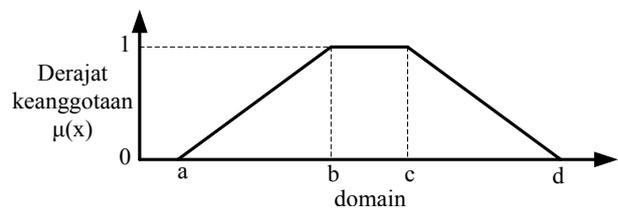
Gambar 1. Representasi linear naik [7]



Gambar 3. Representasi kurva segitiga [7]



Gambar 2. Representasi linear turun [7]



Gambar 4. Representasi kurva trapesium [7]

dipergunakan untuk menghasilkan *steam pressure* hingga 4 bar dan suhu maksimal 200°C. Akan tetapi dikarenakan suhu *steam* optimal yang dimanfaatkan hanya sebesar 125°C hingga 150°C maka penggunaan *set point* hanya mendekati nilai tersebut dan tidak mendekati nilai maksimumnya. Hal ini berkaitan dengan pemanfaatan mini *boiler* ini pada industri rumah tangga yaitu pembuatan susu kedelai. Namun demikian, prinsip kerja *boiler* telah dapat diterapkan dalam mini *boiler* ini.

Dalam beberapa tahun terakhir, model logika *fuzzy* telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan nonlinier dan juga masalah ketidakpastian [3][4]. Saat ini, *Adaptive Neuro Fuzzy Sistem Interface* (ANFIS) secara luas telah mulai digunakan untuk mempersiapkan model *fuzzy* yang berbasis data *boiler* [5][6]. Untuk pengendalian suhu pada mini *boiler* ini digunakan pengendali logika samar (*fuzzy logic*). Selain itu untuk menguji sistem kendali ini maka diberikan gangguan yang berupa perubahan input atau *set point*. Hal lain adalah dengan menguji beberapa fungsi keanggotaan pada pengendali *fuzzy logic* tersebut.

II. LATAR BELAKANG

A. Fuzzy Logic

Fuzzy Logic diperkenalkan tahun 1965 oleh Prof. Lotfi A. Zadeh dari University of California USA. Secara umum, *fuzzy logic* adalah metode berhitung dengan variabel kata-kata (*linguistik variable*), sebagai pengganti berhitung dengan bilangan [7]. *Fuzzy logic* merupakan logika yang memiliki nilai kekaburan atau kesamaran antara benar dan salah. Perbedaan *fuzzy logic* dengan logika klasik dimana logika klasik biasa memiliki nilai tidak = 0 dan ya = 1 sedangkan *fuzzy logic* nilainya antara 0 hingga 1. *Fuzzy logic* dapat digunakan untuk memodelkan berbagai sistem serta memecahkan masalah pemetaan *non-linier*. *Fuzzy logic* yang berdasar pada bahasa manusia, dapat diterapkan dalam desain sistem kontrol tanpa harus menghilangkan teknik desain sistem kontrol konvensional yang terlebih dahulu sudah ada.

B. Fungsi Keanggotaan [7]

Fungsi keanggotaan (*membership function*) merupakan fungsi yang memetakan ruang input menjadi bobot atau derajat keanggotaan antara 0 dan 1. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan adalah dengan pendekatan fungsi. Ada beberapa fungsi yang dapat digunakan, yaitu:

1. Representasi linier

Ada dua keadaan himpunan *fuzzy* linier. Pertama kenaikan himpunan dimulai pada nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan nol (0) bergerak ke kanan menuju ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih tinggi (Gambar 1). Kedua, merupakan kebalikan dari yang pertama. Garis lurus dimulai dari nilai tertinggi kemudian bergerak turun ke nilai yang lebih rendah (Gambar 2).

2. Representasi kurva segitiga

Kurva segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara dua garis (linear) seperti terlihat pada Gambar 3.

3. Representasi kurva trapesium

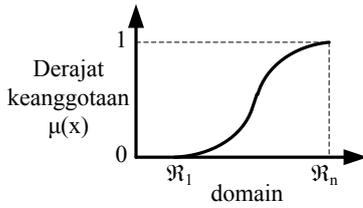
Kurva trapesium pada dasarnya seperti bentuk segitiga hanya saja ada beberapa titik yang memiliki nilai keanggotaan 1 (Gambar 4).

4. Representasi kurva-S

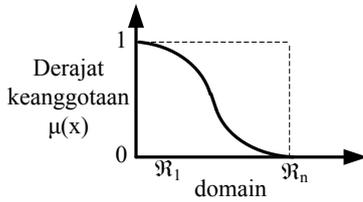
Kurva-S (*sigmoid*) berhubungan dengan kenaikan dan penurunan secara tak linear. Kurva PERTUMBUHAN dan PENYUSUTAN merupakan kurva-S. Kurva-S untuk PERTUMBUHAN akan bergerak dari sisi paling kiri (nilai keanggotaan=0) ke sisi paling kanan (nilai keanggotaan=1) seperti pada Gambar 5. Sedangkan Kurva-S PENYUSUTAN akan bergerak dari sisi paling kanan (nilai keanggotaan=1) ke sisi paling kiri (nilai keanggotaan=0) seperti terlihat pada Gambar 6.

C. Pengendali Fuzzy Logic

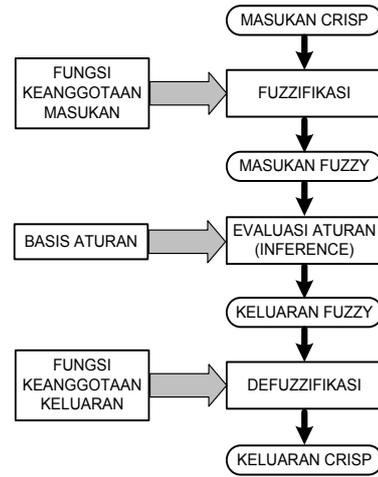
Tujuan utama dalam sistem pengendali adalah mendapatkan keluaran sebagai respon dari masukan. Dalam kendali dengan cara klasik, melibatkan formula-formula matematika yang cukup rumit. Hal ini berbeda



Gambar 5. Kurva-S pertumbuhan [7]



Gambar 6. Kurva-S penyusutan [7]



Gambar 7. Struktur dasar pengendali fuzzy

dengan kendali fuzzy. Pengendali Fuzzy merupakan suatu sistem kendali yang berdasar pada basis pengetahuan manusia dalam melakukan kendali terhadap suatu proses. Konsep matematika yang mendasari logika fuzzy sangat sederhana dan mudah dimengerti. Pendekatan fuzzy melibatkan aturan-aturan yang dinyatakan dalam kata-kata dan tidak memerlukan presisi yang tinggi serta ada toleransi untuk data yang kurang tepat. Struktur dasar sebuah pengendali Fuzzy diperlihatkan pada Gambar 7.

D. Control Valve

Valve (katup, kran, atau klep) yang mempunyai fungsi sebagai pengatur laju aliran fluida yang melewatinya. Jika katup tersebut diinginkan dapat digerakkan secara otomatis sesuai dengan keinginan maka dibutuhkan katup yang dapat dikendalikan biasa disebut control valve. Umumnya pemodelan control valve sebagai berikut [8]:

$$\frac{P'_s(s)}{P'(s)} = \frac{K_V}{\tau_V s + 1} \tag{1}$$

E. Thermocouple

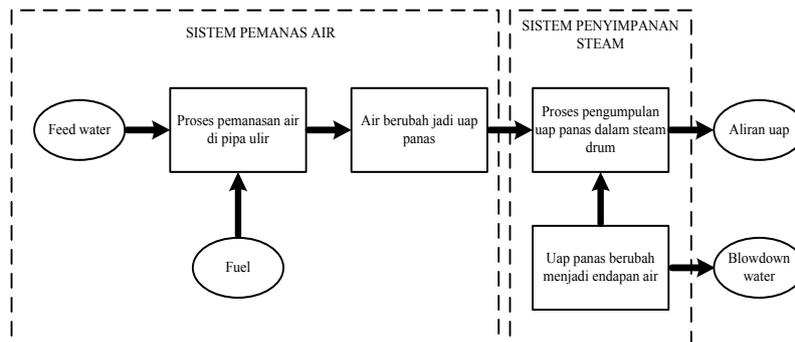
Thermocouple merupakan salah satu contoh sensor suhu yang sering digunakan. Secara umum, fungsi alih thermocouple sebagai berikut [8]:

$$\frac{T_{oy}}{T_{ox}} = \frac{K_T}{\tau_T s + 1} \tag{2}$$

F. Sistem Kerja Mini Boiler

Secara umum sistem kerja mini boiler dalam penelitian ini dapat dikelompokkan menjadi dua sub sistem, yaitu sistem pemanasan air, dan sistem penyimpanan uap panas (steam) seperti terlihat pada Gambar 8. Semua sub sistem tersebut bekerja berurutan sehingga membentuk suatu sistem mini boiler secara keseluruhan. Proses dimulai dari sistem pemanasan air, mula-mula feed water yaitu air, dialirkan menuju pipa ulir kemudian dipanaskan oleh api yang dihasilkan dari proses pembakaran gas elpiji hingga menjadi uap panas. Gas elpiji digunakan sebagai bahan bakar pemanasan dikarenakan kemudahan dalam mendapatkannya dalam kehidupan sehari-hari. Berbeda dengan batubara yang menghasilkan residu (sisa pembakaran) pada proses pembakarannya, penggunaan gas elpiji tidak menghasilkan residu pada proses pemanasan sehingga tidak mengganggu kenyamanan lingkungan. Selain itu, tidak diperlukan daya yang besar seperti halnya jika menggunakan pemanas elektrik untuk menghasilkan panas yang besar. Untuk semua alasan tersebut, akhirnya digunakan gas elpiji sebagai bahan bakar pemanasan.

Selanjutnya proses kerja berganti menjadi sistem penyimpanan uap panas, setelah dipanaskan hingga



Gambar 8. Skema proses kerja pada istem mini boiler



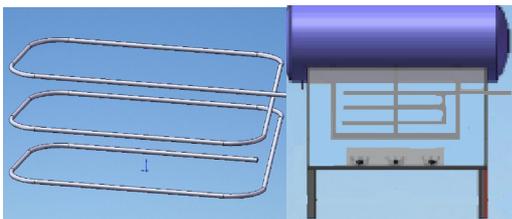
Gambar 9. Rancangan sistem mini boiler

mencapai titik didih air, yaitu 100°C uap panas yang berasal dari pipa ulir akan naik menuju tabung penampungan uap panas (*steam drum*) melalui pipa tegak yang menembus bagian dalam *steam drum*. Kemudian uap panas akan dikumpulkan dalam *steam drum* hingga menghasilkan tekanan yang diinginkan yaitu sebesar 1 bar. Sebagian uap panas yang telah lama mengendap dalam *steam drum* akan berubah menjadi air kembali (*blowdown water*) dan akan dikeluarkan melalui pipa keluaran pada bagian bawah *steam drum*. Semua sistem di atas selalu bekerja saling berurutan dan kontinu, sehingga jika terdapat gangguan pada sebuah sistem, maka sistem lainnya akan menjadi terganggu pula.

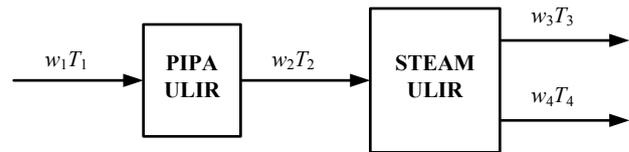
III. METODE

Plant mini boiler yang dirancang seperti tampak pada Gambar 9 menggunakan gas elpiji sebagai bahan bakar untuk sumber panas dan fluida yang digunakan berupa air (H₂O). Tangki penampungan pada mini boiler berbahan *stainless steel* dengan ketebalan 3 mm, ketebalan tangki dimaksudkan agar tangki sebagai tempat penampungan *steam* mampu menahan tekanan *steam* yang besar. *Steam drum* berdimensi panjang 80 cm dengan diameter 40 cm. dibagian bawah *steam drum* ini terdapat serangkaian pipa ulir sebagai jalur air input yang akan dipanaskan seperti terlihat pada Gambar 10. Pipa ulir bertujuan mempercepat proses pemanasan air, sehingga air lebih cepat mendidih dan menjadi uap. Pipa yang digunakan berbahan *stainless steel* dengan ketebalan 1 mm dan diameter lubang 0.8 cm. Selain itu, terdapat pula pipa tegak yang mengelilingi pipa ulir. Pipa tegak tersebut berjumlah 6 tiang dihubungkan oleh pipa mendatar berbentuk persegi panjang yang juga terhubung dengan pipa ulir.

Sebagian dari pipa tegak, yaitu sepanjang 15 cm



Gambar 10. Pipa ulir dan pipa tegak mini boiler



Gambar 11. Variabel yang ada pada sistem mini boiler

masuk ke dalam *steam drum*. Melalui pipa-pipa inilah uap panas yang berasal dari pemanasan *feedwater* pada pipa ulir masuk ke dalam tangki penampungan *steam*. Pipa tegak yang masuk ke dalam *steam drum* juga bertujuan sebagai tempat pemisah antara air endapan (uap panas mengendap lama dalam *steam drum* dalam waktu yang cukup lama akan berubah menjadi air) dan uap panas yang berada dalam *steam drum*. Uap yang telah terbentuk dari hasil pemanasan akan bergerak keatas menuju *steam drum* kemudian dikumpulkan dalam *steam drum* hingga mencapai tekanan yang diinginkan. Sedangkan endapan air yang dihasilkan akan dikeluarkan melalui pipa pada bagian bawah *steam drum* secara manual. Sistem pemanasan air pada mini boiler menggunakan tiga buah tungku api berbahan bakar gas untuk mempercepat proses pemanasan dalam pipa ulir.

A. Pemodelan Sistem

Pada langkah ini akan dilakukan beberapa pemodelan terhadap peralatan yang ada pada mini boiler, yaitu:

1. Pemodelan sistem mini boiler

Pemodelan sistem dilakukan berdasarkan hukum kesetimbangan massa (*mass balance*) dan energi (*energi balance*). Secara sederhana dapat ditentukan variabel yang terdapat pada mini boiler, variabel-variabel tersebut digambarkan dalam diagram blok Gambar 11, dimana w_1 menyatakan laju aliran *feedwater* (kg/s), w_2 menyatakan laju aliran *steam* menuju *steam drum* (kg/s), w_3 menyatakan laju aliran *steam* output (kg/s), w_4 menyatakan laju aliran *blowdown water* (kg/s), T_1 menyatakan suhu *feedwater* (°C), T_2 menyatakan suhu *steam* yang menuju *steam drum* (°C), T_3 menyatakan suhu *steam* keluaran (°C), dan T_4 menyatakan suhu *blowdown water* (°C).

Berdasarkan model variabel di atas, maka diperoleh persamaan kesetimbangan massa dan energi sistem [9]:

$$\frac{d\rho V(t)}{dt} = w_i(t) - w(t) \quad (3)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{1}{\rho} [w_i(t) - \{w_3(t) + w_4(t)\}] \quad (4)$$

$$C \frac{d\{V(t)\rho(T - T_{ref})\}}{dt} = w_1(t)C\{T_1(t) - T_{ref}\} - [w_3(t)C\{T(t) - T_{ref}\} + w_4(t)C\{T(t) - T_{ref}\}] + Q(t) \quad (5)$$

$$\frac{d\{\rho V(t)CT_3(t)\}}{dt} = w_1CT_1(t) - \{w_3CT_3(t) + w_4CT_4(t)\} + Q(t) \quad (6)$$

dimana $V(t)$ merupakan volume *steam* dalam *steam drum* C merupakan kalor jenis air. Persamaan (4) dan (6) mewakili kesetimbangan massa dan energi dari sistem kerja mini *boiler* yang digunakan.

Dengan mensubstitusikan Persamaan (4) ke Persamaan (6), maka diperoleh [9]:

$$\frac{dT_3(t)}{dt} = T_3(t) \left\{ \frac{1}{V\rho} (w_4(t) - w_1(t)) \right\} + \frac{1}{V\rho} \left(w_1(t)T_1(t) - w_4(t)T_4(t) + \frac{Q(t)}{C} \right). \quad (7)$$

Persamaan (7) merupakan persamaan yang mewakili sistem kerja mini *boiler*. Untuk mendapatkan fungsi alih sistem, maka perlu dilakukan linearisasi sistem, salah satunya menggunakan deret Taylor. Dengan menggunakan deret Taylor, Persamaan (7) berubah menjadi:

$$\frac{dT_3'}{dt} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{w_{4,s} - w_{1,s}}{V_s} \right) T_3'(t) + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{w_{1,s}}{V_s^2} (T_{3,s} - T_{1,s}) - \frac{w_{4,s}}{V_s^2} (T_{4,s} - T_{3,s}) \right\} V'(t) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{T_{1,s} - T_{3,s}}{V_s} \right) w_1'(t) + \frac{Q'(t)}{V_s \rho C}. \quad (8)$$

2. Fungsi Alih

Dalam penelitian ini pengendalian difokuskan pada pengendalian suhu dalam *steam drum* saja, yaitu pada T_3 . Sehingga beberapa variabel dianggap konstan. Dalam pembatasan masalah, masukan air dianggap konstan (T_1 dan w_1 konstan). Selain itu, untuk melakukan pengontrolan suhu dalam *steam drum*, maka volume dalam *steam drum* dianggap tetap, dan *blowdown water* (T_4 dan w_4) dianggap gangguan, sehingga persamaan sistem berubah menjadi:

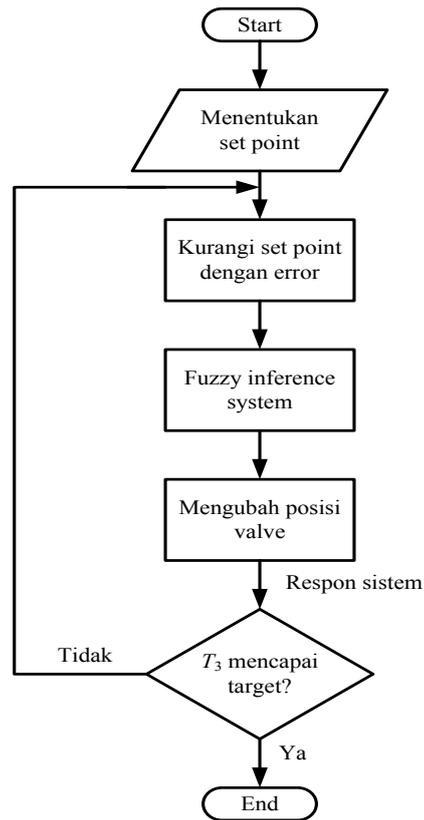
$$\frac{dT_3(t)}{dt} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{w_{1,s} - w_{4,s}}{V_s} \right) T_3'(t) = \frac{Q'(t)}{V_s \rho C} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{T_{3,s} - T_{4,s}}{V_s} \right) w_4'(t) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{w_{4,s}}{V_s} \right) T_4'(t). \quad (9)$$

Dengan menggunakan transformasi Laplace diperoleh fungsi alih sistem, sebagai berikut:

$$T_3'(s) = \frac{Q'(s)}{V_s \rho C s + (w_{1,s} - w_{4,s}) C} + \left\{ \frac{(T_{3,s} - T_{4,s})}{V_s \rho s + (w_{1,s} - w_{4,s})} \right\} w_4'(s) - \left\{ \frac{w_{4,s}}{V_s \rho s + (w_{1,s} - w_{4,s})} \right\} T_4'(s). \quad (10)$$

B. Perancangan Sistem Kendali Fuzzy

Setelah memodelkan seluruh komponen penting dalam sistem mini *boiler*, langkah selanjutnya adalah merancang sistem kendali *fuzzy* pada mini *boiler*. Berikut adalah bagan alir keseluruhan sistem pada mini *boiler* ini seperti terlihat pada Gambar 12.



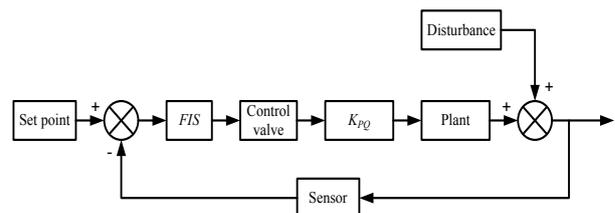
Gambar 12 Diagram alir sistem kendali suhu

C. Perancangan Sistem

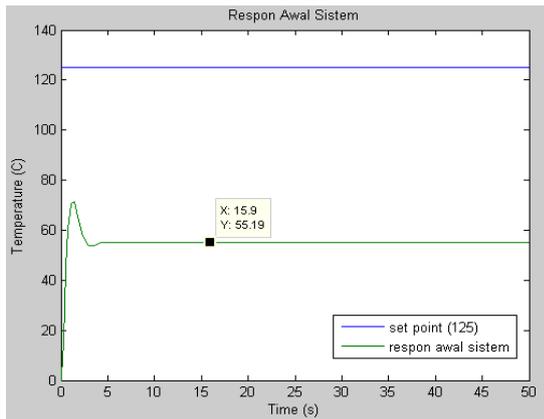
Pada langkah ini akan dirancang sistem kendali suhu pada mini *boiler* ini. Diagram blok rancangan sistem kendali suhu mini *boiler* ini dapat dilihat pada Gambar 13. *Fuzzy logic controller* dibuat menjadi 4 model berbeda berdasarkan jumlah fungsi keanggotaan pada variabel suhu, yaitu 3; 5; 7; dan 9 fungsi keanggotaan.

Berdasarkan bagan alir yang dirancang, target sistem adalah mencapai suhu sesuai dengan *set point* yang telah ditentukan pada *steam drum*, dan pengontrolan suhu dilakukan melalui *control valve* pada sistem pembakaran, sehingga dapat ditentukan bahwa suhu *steam drum* dan besar *error* merupakan variabel masukan pada *fuzzy inference system*. Sedangkan variabel keluarannya adalah posisi *valve*.

Untuk fungsi keanggotaannya, variabel masukan menggunakan representasi kurva Gauss sedangkan variabel keluaran menggunakan representasi linear naik. Hal ini dikarenakan representasi kurva Gauss dapat



Gambar 13. Diagram blok sistem kendali suhu menggunakan *fuzzy logic controller*



Gambar 14. Respon awal sistem

mendekati perubahan naik turun suhu yang tidak linear dan untuk posisi *valve* dianggap linear sehingga dapat didekati dengan menggunakan representasi linear. Dalam penelitian ini menggunakan aturan Mamdani.

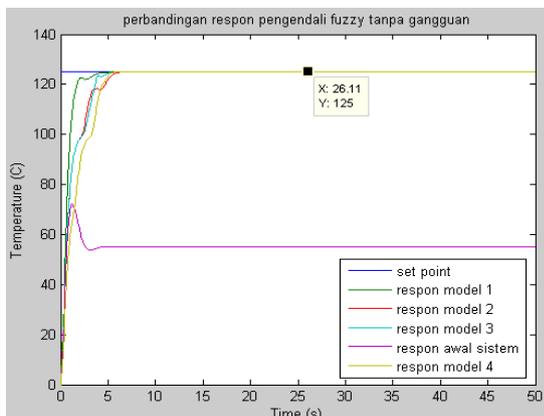
D. Pengujian Sistem

Pada langkah terakhir ini yaitu dilakukan dengan menguji sistem kendali yang telah dibuat. Agar didapatkan hasil yang baik maka akan diberikan gangguan terhadap sistem ini. Adapun gangguan yang diberikan adalah berupa perubahan *set point* sehingga akan terlihat pada fungsi keanggotaan besar respon sistem yang baik. Setelah dilakukan pengujian kemudian akan dilihat respon sistem tersebut dan dilakukan analisa terhadap hasil respon yang didapat.

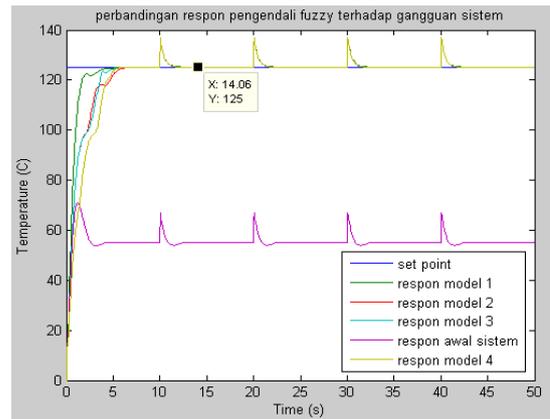
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Respon Awal Sistem dan Respon Pengendali

Gambar 14 terlihat bahwa respon awal sistem hanya pada suhu 55.19°C. Hal ini tidak sesuai dengan *set point* (125°C). Untuk itu diperlukan pengendali untuk menaikkan tingkat kestabilan sistem hingga *set point* yang diinginkan. Sedangkan Gambar 15 menunjukkan bahwa pengendali *fuzzy* mampu menaikkan tingkat kestabilan sistem hingga mencapai *set point* yang diinginkan.



Gambar 15. Respon sistem kendali suhu menggunakan pengendali *fuzzy*



Gambar 16. Respon sistem kendali suhu menggunakan pengendali *fuzzy* terhadap gangguan luar sistem

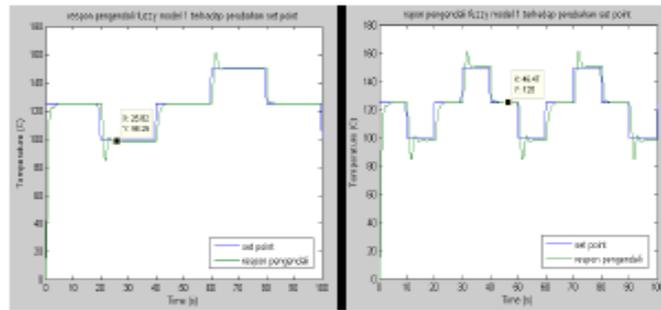
B. Respon Pengendali terhadap Gangguan dari Luar Sistem (Outside)

Gangguan sistem dibuat berdasarkan hasil pemodelan sistem kendali ruang pembakaran mini *boiler* berupa masukan pulsa yang ditambahkan ke dalam sistem secara teratur berdasarkan periode yang ditetapkan. Amplitudo gangguan sebesar 25. Gangguan sistem terjadi setiap 10 detik dengan pulsa sebesar 0.5 % tiap periode. Gambar 16 menunjukkan respon masing-masing model pengendali terhadap gangguan sistem. Dari gambar tersebut diketahui bahwa semua pengendali mampu mempertahankan kestabilan sistem sesuai *set point*. Hanya pada saat gangguan terjadi, sistem mengalami *overshoot* sebelum mencapai kestabilan.

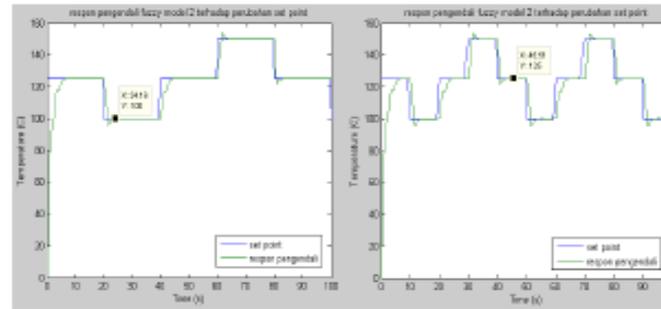
C. Respon Pengendali terhadap Perubahan Set Point

Gangguan dimaksudkan untuk melihat respon sistem apabila terjadi perubahan pada *set point* yang ditentukan. Perubahan *set point* terjadi setiap 10 detik dan 20 detik dibuat teratur pada nilai [125°C–100°C–125°C–150°C]. Berikut adalah respon sistem kendali suhu mini *boiler* terhadap perubahan *set point*.

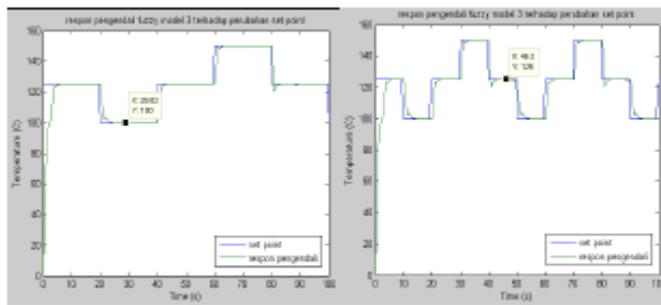
Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan terhadap pengendali *fuzzy* model ke 1, 2, 3, dan 4 seperti terlihat pada Gambar 17, maka dapat diketahui bahwa pengendali *fuzzy* mampu memperbaiki respon sistem yang mulanya hanya mencapai kestabilan pada titik 55°C menjadi 125°C pada semua model pengendali yang dirancang. Berdasarkan data hasil pengujian dapat diketahui bahwa semakin banyak fungsi keanggotaan dalam suatu variabel *fuzzy*, maka respon pengendali yang dihasilkan semakin baik. Tidak ada *overshoot* yang dihasilkan untuk semua model, namun hanya terjadi lonjakan kecil. Pada pengendali *fuzzy* model ke 1 sebesar 122.7965°C; pengendali *fuzzy* model ke 2 sebesar 118.31°C; pengendali *fuzzy* model ke 3 sebesar 123.58; dan pengendali *fuzzy* model ke 4 tidak ada lonjakan. Namun, semakin banyak fungsi keanggotaan dalam suatu variabel *fuzzy* maka *rise time* yang dihasilkan semakin lambat. Pada pengendali model ke 1, *rise time* yang dihasilkan



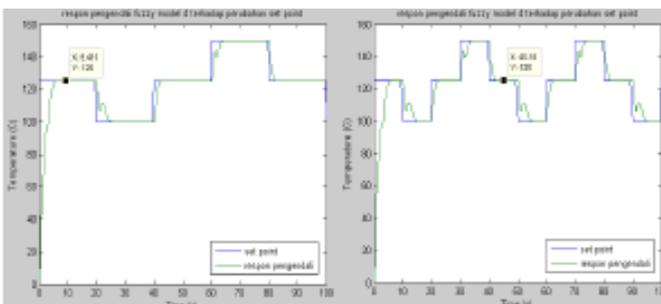
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 17. Respon sistem kendali suhu menggunakan pengendali fuzzy terhadap gangguan *set point* dalam sistem, (a). pengendali model ke 1; (b). pengendali model ke 2; (c). pengendali model ke 3; (d). pengendali model ke 4

sebesar 1.1867 detik; 2.7634 detik untuk pengendali fuzzy model ke 2; 2.9912 detik untuk model ke 3; dan pada pengendali model ke 4, *rise time* yang dihasilkan sebesar 3.6267 detik. Pada saat terjadi gangguan sistem terdapat *overshoot* setiap 10 detik yang rata-rata mencapai titik 137°C untuk pengendali fuzzy model ke 1; 136.9°C untuk pengendali fuzzy model ke 2; 137°C untuk pengendali fuzzy model ke 3; dan 136.9°C untuk pengendali fuzzy model ke 4. Hal tersebut disebabkan gangguan yang ditambahkan

ke dalam sistem setiap 10 detik. Pengendali fuzzy dapat mengembalikan kestabilan sistem pada tingkat kestabilan yang dicapai dalam waktu 3.97 detik pada pengendali fuzzy model ke 1; 2.71 detik pada pengendali fuzzy model ke 2; 2.28 detik pada pengendali fuzzy model ke 3; dan 2.59 detik pada pengendali fuzzy model ke 4. Kestabilan yang dicapai sesuai dengan *set point*, yaitu 125°C.

Secara keseluruhan, pengendali fuzzy merupakan pengendali yang sangat baik untuk memperbaiki

respon sistem. Penambahan jumlah fungsi keanggotaan dalam suatu variabel *fuzzy* dapat menghasilkan respon sistem yang semakin baik. Selain itu, semakin banyak fungsi keanggotaan dalam suatu variabel *fuzzy* akan menghasilkan *rise time* yang semakin lambat. Pada saat terjadi perubahan nilai *set point*, yakni 125°C, 100°C, dan 150°C, pengendali mampu mendekati *set point* 125°C dengan baik yaitu pada titik 125°C untuk semua model pengendali *fuzzy* yang dirancang. Pada saat nilai *set point* 100°C dan 150°C, pengendali *fuzzy* mampu mendekati nilai *set point* dengan baik. Hal tersebut dapat dilihat pada saat *set point* bernilai 100°C, pengendali *fuzzy* model ke 1 mencapai kestabilan pada titik 97.92°C; pengendali *fuzzy* model ke 2 mencapai kestabilan pada titik 100°C; pengendali *fuzzy* model ke 3 dan model ke 4 juga mampu mencapai kestabilan pada titik 100°C. Pada saat *set point* bernilai 150°C pengendali *fuzzy* model ke 1 mampu stabil pada titik 150.7°C; pengendali *fuzzy* model ke 2, model ke 3, dan model ke 4 mencapai kestabilan pada titik 150°C.

V. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian didapat bahwa pengendali *fuzzy* mampu memperbaiki tingkat kestabilan sistem yang mulanya stabil pada titik 55°C menjadi lebih baik, yaitu 125°C pada semua model pengendali *fuzzy* yang dirancang.

Semakin banyak fungsi keanggotaan dalam suatu variabel *fuzzy*, maka respon yang dihasilkan akan semakin baik. Hal tersebut dapat dilihat dari tidak adanya *overshoot* yang dihasilkan pada semua model, hanya terjadi lonjakan kecil yaitu pada pengendali *fuzzy* model ke-1 sebesar 122.7965°C; pengendali *fuzzy* model ke-2 sebesar 118.31°C; pengendali *fuzzy* model ke-3 sebesar 123.58°C; dan pengendali *fuzzy* model ke-4 tidak ada lonjakan.

Rise time yang dihasilkan akan semakin lambat seiring dengan semakin banyaknya fungsi keanggotaan variabel *fuzzy*, yaitu 1.1787 detik pada pengendali *fuzzy* model ke 1; 2.7622 detik pada pengendali *fuzzy* model ke-2; 2.9905 detik pada pengendali *fuzzy* model ke-3; dan 3.6255 detik pada pengendali *fuzzy* model ke-4.

REFERENSI

- [1] C. K. Weng, A. Ray, and X. Dai, "Modeling of power plant dynamics and uncertainties for robust control synthesis," *Application of Mathematical Modeling*, vol. 20, pp. 1340-1345, Jul. 1996.
- [2] F. P. de Mello, "Boiler models for system dynamic performance studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no.1, pp. 66-74, Feb. 1991.
- [3] X. Chang and W. Li, "A c-mean clustering based fuzzy modeling method," in *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, May 2000, vol. 2, pp. 937-940.
- [4] U. Y. Huh and J. H. Kim "MIMO fuzzy model for boiler-turbine system," in *Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 1996, vol. 1, pp. 541-547.
- [5] H. Ghezelayagh and K. Y. Lee, "Intelligent predictive control of a power plant with evolutionary programming optimizer and neuro-fuzzy identifier," in *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, 2002, vol. 1, pp. 1308-1313.
- [6] H. Ghezelayagh and K. Y. Lee, "Application of neuro fuzzy identifier in the predictive control of power plant," in *15th Triennial World Congress*, Spain, 2002.
- [7] S. Kusumadewi, *Artificial Intelligence (Teknik dan Aplikasinya)*, Yogyakarta, Indonesia: Penerbit Graha Ilmu, 2003.
- [8] D. E. Seeborg, T. F. Edgar, and D. A. Mellichamp, *Process Dynamics and Control*, Canada: John Wiley & Sons, 1989.
- [9] G. Stephanopoulos, *Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice*, New Jersey, NJ: Prentice Hall, 1984.