PERANCANGAN SISTEM KENDALI TEMPERATUR UAP *SUPERHEATER* DENGAN MENGGUNAKAN METODE *FUZZY SLIDING MODE CONTROL*

Mardiana Septiani, Mardlijah
Jurusan Matematika, Fakultas MIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember(ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
email :mardlijah@matematika.its.ac.id

***Abstrak*—Pada suatu sistem PLTU, *boiler* adalah komponen yang memegang peranan penting. *Superheater* merupakan salah satu komponen dalam *boiler* yang berfungsi untuk merubah uap jenuh menjadi uap panas lanjut. Variabel yang diukur dalam *superheater* adalah temperatur uap dimana *set point* yang harus dicapai adalah 814 K. Pada penelitian ini dirancang sistem pengendali FSMC pada sistem temperatur uap *superheater* dan analisis terhadap performansi sistemnya dengan membandingkan metode FSMC dengan SMC. Pengendali FSMC dapat menghasilkan temperatur uap yang stabil di sekitar 813.9 K baik tanpa gangguan maupun dengan gangguan eksternal dan internal, sedangkan dengan pengendali SMC, temperatur uap dapat stabil di sekitar 813.5 K. Sehingga didapatkan kesimpulan bahwa pengendali FSMC dapat menghasilkan temperatur uap yang lebih akurat (*error* yang lebih kecil) daripada SMC, namun pengendali FSMC memiliki kekurangan yaitu membutuhkan waktu yang lebih lama daripada pengendali SMC.**

Kata Kunci: Superheater, Sliding Mode Control, Fuzzy Sliding Mode Control.

I. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu produsen listrik yang diandalkan untuk dapat memenuhi kebutuhan energi listrik di Indonesia. PLTU memanfaatkan energi kalor untuk diubah menjadi energi listrik. Mula-mula energi kalor dipakai untuk menguapkan air di dalam *boiler* hingga mencapai tekanan dan temperatur tertentu. Uap tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin, sehingga turbin dapat menggerakkan generator listrik

Pada suatu sistem PLTU, *boiler* adalah komponen yang memegang peranan penting. *Superheater* merupakan salah satu komponen dalam *boiler* yang berfungsi untuk merubah uap jenuh menjadi uap panas lanjut. Variabel yang diukur dalam *superheater* adalah temperatur uap dimana *set point* yang harus dicapai adalah 541°C. Pengendalian temperatur uap pada *superheater* adalah hal yang sangat penting untuk keamanan dan efisiensi operasional dari *boiler*. Disinilah uap yang digunakan untuk memutar turbin pertama kali dihasilkan.

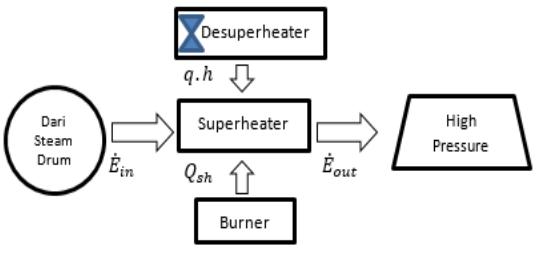
Salah satu metode yang cukup diminati dan menjadi usulan para ilmuwan dewasa ini adalah *Sliding Mode Control* (SMC). Pengendali SMC memiliki beberapa kelebihan, yaitu sifatnya yang sangat robust, yang mampu bekerja dengan baik pada sistem nonlinear yang memiliki ketidakpastian model ataupun parameter. Namun demikian, pengendali SMC masih memiliki kekurangan, yaitu sedikit lebih rumit dalam perancangannya dan masih adanya *error* [1].

Untuk memperbaiki performansi sistem, SMC murni dimodifikasi dan dikombinasikan dengan konsep *Fuzzy Logic Control* (FLC) sehingga hasil modifikasi ini disebut *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC). Sehingga pada Tugas Akhir ini, akan dirancang suatu desain sistem kendali temperatur uap pada *superheater* dengan menggunakan metode *Fuzzy Sliding Mode Control*.

II. URAIAN PENELITIAN

2.1 Sistem *Superheater*

Superheater merupakan suatu komponen dalam *boiler* yang digunakan untuk memanaskan lanjut uap saturasi sampai dihasilkan uap yang benar–benar kering. Pada pengendalian temperatur *superheater* ini, temperatur harus dijaga supaya selalu mencapai *set point*, agar sesuai dengan temperatur yang digunakan untuk memutar turbin. Bila temperatur melebihi *set point*, maka akan menjadi uap kering yang membahayakan bagi turbin serta bahan bakar akan terbuang sia-sia. Oleh karena itu, jika temperatur melebihi set point, *desuperheater* (*superheater* spray) akan mengeluarkan air yang berfungsi unuk menurunkan suhu hot steam hingga mencapai *set point.* Sistem temperatur uap *superheater* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem Temperatur Uap pada Superheater

Hukum kesetimbangan energi menyatakan bahwa laju energi yang masuk ke dalam sistem adalah sebanding dengan laju energi yang keluar dari sistem dan energi yang terakumulasi di dalam sistem itu sendiri [2].

Persamaan yang dibentuk dari hukum kesetimbangan energi pada *superheater* secara matematis adalah:

$$\dot{E}_{sh} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + Q$$

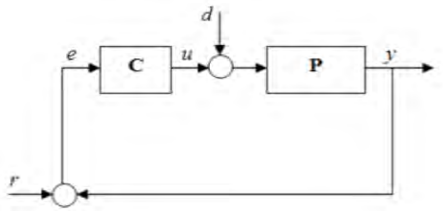
Sehingga dapat ditulis:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{V_{sh}\cdot\rho}\left(\dot{m}_{in}.(T_{in} - T_{ref}) - \dot{m}_{out}.(T_{out} - T_{ref}) + \frac{Q_{sh}}{c_p} + \frac{q.h}{c_p}\right) \quad (1)$$

Dengan $\dot{E}_{sh}$ Total laju energi pada *superheater*, $\dot{E}_{in}$ Laju energi *input superheater*, $\dot{E}_{out}$ Laju energi *output superheater*, ρ Massa jenis steam *superheater*, V_{sh} Volume *superheater,* c_p Kalor spesifik *superheater*, $\dot{m}_{in}$ Laju aliran *input* massa steam *superheater*, $\dot{m}_{out}$ Laju aliran *output* massa steam *superheater*, T_{in} Temperatur *input superheater*, T_{out} Temperatur *output superheater,* Q_{sh} Kalor pembakaran pada *superheater* per detik, q Laju aliran massa steam *desuperheater* dan h Entalpi steam *desuperheater*.

2.2 Sistem Pengendalian

Secara umum, sistem pengendali dapat digambarkan sebagai berikut. [3]



Gambar 2. Diagram blok sederhana dari sistem lup tertutup.

Gambar 2 menunjukkan diagram blok sederhana dari sistem lup tertutup dengan *r* adalah *reference point* atau nilai yang diinginkan, *d* gangguan bagi sistem, *e* sinyal *error*, *u control input*, *y* keluaran sistem, C sistem pengendali, dan P adalah plant.

2.3 *Sliding Mode Control* (SMC)

Sliding Mode adalah merupakan teknik umpan balik terlebih dahulu dengan mendefinisikan permukaan. Sistem yang dikendalikan (variabel) akan dipindahkan ke permukaan dan sistem gerak diarahkan ke titik ekuilibrium yang diinginkan. [4].

Pandang suatu sistem dinamis [5]:

$$x^{(n)}(t) = f(x,t) + b(x,t).u + d(t)$$

dimana *u* adalah control *input*, *x* merupakan vektor keadaan, *f*(*x,t*) dan *b*(*x,t*) berupa fungsi terbatas, *d*(*t*) gangguan eksternal. Jika x_d merupakan *x* yang diinginkan, maka tracking error-nya dapat dinyatakan dengan:

$$e(t) = x(t) - x_d(t)$$

Fungsi *switching* yaitu permukaan *S*(*x,t*) di dalam ruang keadaan R^n, memenuhi persamaan:

$$S(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e$$

Dengan λ berupa konstanta positif. Dimana fungsi *switching* ini digunakan untuk menentukan besarnya nilai *u* agar memenuhi kondisi *sliding*.

Permukaan *sliding* (*sliding surface*) merupakan persamaan yang memenuhi

$$S(x, t) = 0$$

Besar nilai *control input* pada SMC bergantung pada nilai S, sehingga memenuhi pertidaksamaan yang disebut kondisi *sliding*. Kondisi tersebut ditulis dalam bentuk sebagai berikut :

$$S\dot{S} < 0 \text{ atau } \dot{S}sgn(S) \leq -\eta$$

2.3 *Fuzzy Logic Control* (FLC)

Pengendali *fuzzy* (*fuzzy* controller) umumnya bekerja secara heuristic (trial and error) dan berdasarkan pengalaman manusia. Himpunan *fuzzy* A dalam semesta pembicaraan U biasa dinyatakan sebagai sekumpulan pasangan elemen *u* (*u* anggota *U*) dan besarnya derajat keanggotaan *(grade of membership)* elemen tersebut, μ*A* sebagai :

$$A = \{ (u, \mu A(u) / u \in U) \}$$

Suatu pengendali *fuzzy* tersusun dari empat buah komponen yang bekerja bersamaan dan dapat diuraikan sebagai [6]:

1. Fuzzifikasi, mengubah masukan nilai-nilai *crisp* menjadi nilai-nilai *fuzzy* dan mengubah input data ke dalam nilai-nilai inguistik yang cocok.
2. *Knowledge base*, berisi aturan *fuzzy* dalam mengendalikan sistem.
3. *Inference mechanism,* mengevaluasi aturan kontrol yang relevan dan mengambil keputusan masukan yang akan digunakan untuk plant.
4. Defuzzifikasi, mengubah kesimpulan yang diperoleh dari *inference mechanism* menjadi masukan plant, dari nilai *fuzzy* menjadi nilai *crisp*.

2.4 Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)

Untuk memperbaiki performansi sistem SMC, dilakukan modifikasi pada SMC dengan menggunakan FLC. Modifikasi ini umumnya disebut sebagai *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC) atau *Sliding Mode Fuzzy Logic Control* (SMFLC).

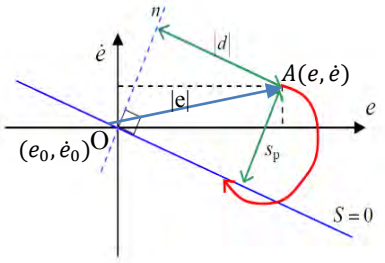
Suatu pengendali FSMC tersusun oleh dua macam pengendali, yaitu pengendali SMC dan FLC. Pengendali SMC tidak bekerja secara penuh sebagaimana pengendali SMC murni. Namun, setelah melalui beberapa tahapan yang akan diproses dengan pengendali FLC. *Input*an pada pengendali *fuzzy* adalah dua variabel yang ditentukan sebelumnya melalui pengendali SMC, yaitu *s* dan *d*. Variabel – variabel ini selanjutnya diproses dengan pengendali FLC sehingga keluaran

dari pengendali FLC ini adalah *control input u* untuk *plant* [7].

Perancangan pengendali FSMC bekerja sebagaimana SMC, yaitu menggunakan sebuah permukaan *sliding*. Oleh karena itu, tetap digunakan fungsi *switching* untuk menentukan besarnya nilai *u*. Namun langkah – langkah dalam merancang pengendali FSMC lebih sederhana daripada merancang pengendali SMC, terutama dalam hal menentukan besarnya *control input u*. Karena pada FSMC, besarnya *u* diperoleh dari aturan *fuzzy* dengan bentuk:

R_C^i: **Jika** $s = L_{S_i}$ **dan** $d = LD_i$ **maka** $u = LU_i$

dimana *s* adalah jarak antara vektor keadaan dan permukaan *sliding*, dan *d* adalah jarak antara vektor keadaan dan vektor normal ke permukaan *sliding* dimana vektor normal melalui titik asal dari ruang keadaan. $LS_i \epsilon TS$ dan $LD_i \epsilon TD$ masing – masing adalah nilai *fuzzy* dari variabel keadaan *fuzzy s* dan *d* pada daerah *fuzzy* ke-*i* dari ruang keadaan *fuzzy*. $\boldsymbol{LU_i}$ adalah vektor masukan *fuzzy* yang berkorespondensi pada daerah *fuzzy* ke-*i* dari ruang keadaan *fuzzy*. **TS**, **TD** dan **TU** adalah himpunan dari *s*, *d* dan *u* yang mencakup range dari nilai *fuzzy s*,*d* dan ***u*.**



Gambar 3. Interpretasi Grafiis s_p dan *d*

Berdasarkan interpretasi grafis s_p dan *d* pada bidang $e\dot{e}$, nilai s_p dapat diperoleh dengan menggunakan rumus jarak titik A $(e, \dot{e})$ ke garis *S*=0, dengan $S = \dot{e} + \lambda e = 0$ sebagai berikut:

$$S_p = \frac{|\dot{e}+\lambda e|}{\sqrt{1^2+\lambda^2}}$$

Sedangkan untuk mendapatkan nilai *d* dapat digunakan teorema pytagoras, sehingga diperoleh :

$$d = \sqrt{e^2 - s_p^2}$$

Aturan umum *Fuzzy* untuk Pengendali FSMC ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Aturan Umum *Fuzzy* untuk Pengendali FSMC

		S_P							
		NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
d	B	PB	PB	PB	PB	NB	NB	NB	NB
	M	PB	PB	PB	PM	NM	NB	NB	NB
	S	PB	PB	PM	PS	NS	NM	NB	NB
	Z	PB	PM	PS	PZ	NZ	NS	NM	NB

2.5 Perancangan Pengendali

FSMC merupakan kombinasi dari SMC dan FLC (*Fuzzy Logic Control*). Sehingga untuk merancang pengendali FSMC diperlukan suatu fungsi *switching S* sebagai berikut:

$$S = \dot{\tilde{T}} + \lambda \tilde{T}$$

Dengan

$$\tilde{T} = T - T_d$$
$$\dot{\tilde{T}} = \dot{T} - \dot{T_d}$$

Permukaan slidingnya adalah :

$$\dot{\tilde{T}} + \lambda \tilde{T} = 0$$

Penentuan nilai control input u pada FSMC menggunakan dua variabel masukan pada fuzzy yaitu s_p dan *d* seperti yang telah dibahas sebelumnya. Sehingga didapat :

$$S_p = \frac{|\dot{\tilde{T}}+\lambda\tilde{T}|}{\sqrt{1^2+\lambda^2}} \qquad (2)$$

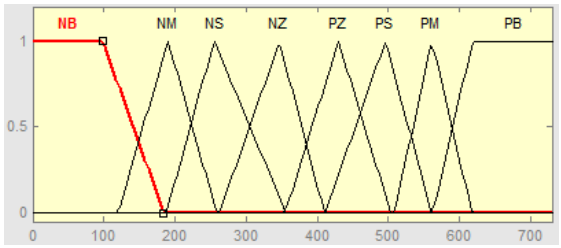
$$d = \sqrt{\tilde{T}^2 - s_p^2} \qquad (3)$$

Pada penentuan fungsi keanggotaan, perlu diketahui batasan nilai s_p dan *d*. Hal ini dapat dilihat dari hasil scope nilai s_p dan *d* dari perancangan pengendali SMC yang telah dibuat sebelumnya. Sehingga didapat intervalnya yaitu:

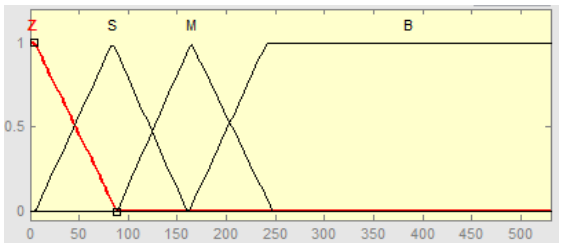
$S_p \epsilon$ [0 730]

$d \epsilon$ [0 530]

Setelah diketahui masing-masing variabel, selanjutnya dirancang fungsi keanggotaan dari s_p dan *d* seperti ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.

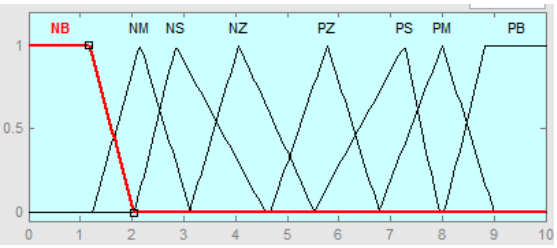


Gambar 4. Fungsi Keanggotaan s_p pada Pengendali FSMC



Gambar 5. Fungsi Keanggotaan *d* pada Pengendali FSMC

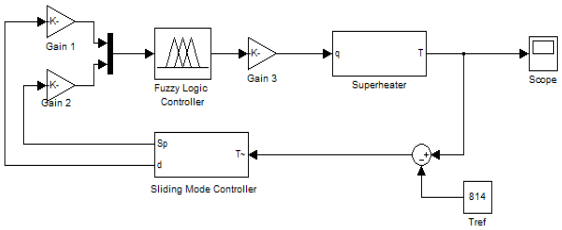
Nilai *control input u* secara umum ditentukan dengan menyesuaikan kemampuan dari *q* atau kalor pembakaran yang dikeluarkan. Pada penelitian ini fungsi keanggotaan nilau *u* dirancang sedemikian sehingga diperoleh seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Fungsi Keanggotaan *Control Input u* pada Pengendali FSMC

Aturan *fuzzy* yang digunakan untuk pengendali FSMC pada sistem *superheater* dapat dilihat pada Tabel 1.

Setelah diperoleh rancangan fungsi keanggotaan dan aturan *fuzzy*, langkah selanjutnya adalah mengimplementasikan diagram blok dan rancangan fuzzy pada Matlab. Hasil perancangan FSMC pada Simulink dapat dilihat pada Gambar 7, dimana rangkaian sistem berupa lup tertutup dengan sistem pengendali berupa pengendali *fuzzy*.



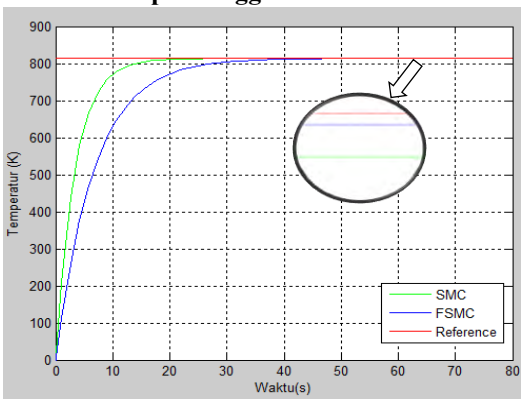
Gambar 7. Diagram Blok Sistem Superheater dengan Pengendali FSMC

Pada Gambar 7, Blok Subsistem Superheater didapat dari persamaan (1), dan blok Subsistem Sliding Mode Control didapat dari persamaan (2) dan (3). Agar dapat dibandingkan dengan hasil pengendalian SMC, pada pengendali FSMC ini digunakan nilai λ = 0,3. Sedangkan nilai gain1, gain2, dan gain diperoleh dengan cara *trial and error*. Pada penelitian ini diambil nilai-nilai gain untuk sistem pengendali FSMC yaitu g1 = 0.0076, g2 = 0.0001, dan g3 = 0.7.

III. ANALISIS HASIL SIMULASI

Pada simulasi akan digunakan rancangan SMC sebagai pembanding dengan rancangan FSMC. Selanjutnya dari masing-masing pengendali akan dilakukan pengamatan tanpa gangguan dan dengan gangguan. Gangguan yang diberikan berupa sinyal *impuls* dan *square*. Hal ini dilakukan untuk menguji sifat *robust* sistem pengendali terhadap ketidakpastian sistem dengan menganalisa performansi sistem. Setiap simulasi yang yang dilakukan menggunakan nilai Cp=2822, ρ=50.4, V_{sh}=21.45, dan h=83562. Sedangkan parameter-parameter yang digunakan $\dot{m}_{in}$=152.77, $\dot{m}_{out}$=160.27, T_{in}=634, dan Q_{sh}=77103935.

3.1 Simulasi Tanpa Gangguan

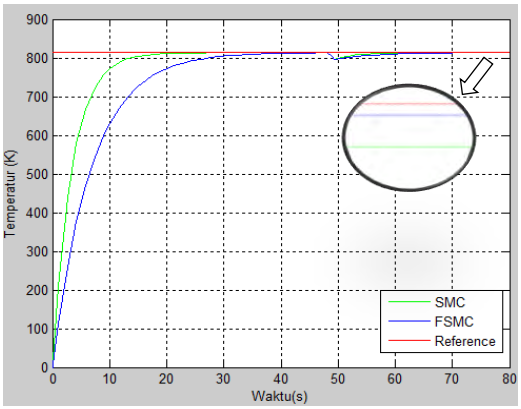


Gambar 8. Grafik Temperatur Uap tanpa Gangguan

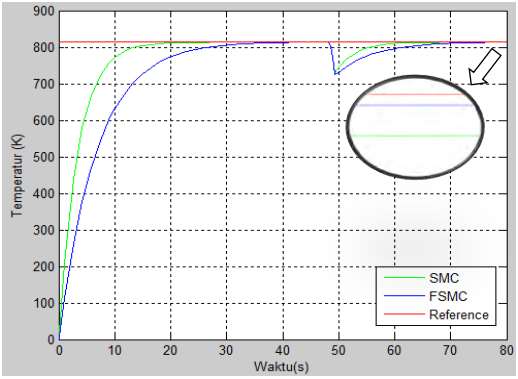
Pada Gambar 8 tampak bahwa kondisi tanpa gangguan, sistem pengendali FSMC lebih lambat daripada pengendali SMC. Namun jika dilakukan pembesaran pada hasil simulasi diperoleh bahwa pengendali FSMC memiliki nilai *error* yang jauh lebih baik daripada SMC. Pengendali FSMC memiliki nilai *error* sebesar -0.0937 sedangkan pengendali SMC memiliki nilai *error* sebesar -0.5028. Pengendali FSMC dapat stabil disekitar 813.9 K sedangkan pengendali SMC stabil disekitar 813.5 K.

3.2 Simulasi dengan Gangguan Eksternal

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa masing-masing pengendali akan diberi gangguan yang berasal dari luar (eksternal) berupa sinyal *impuls* dan *square*. Sinyal impuls merupakan sinyal yang bernilai sangat besar dan muncul dalam waktu yang sangat singkat. Pada simulasi ini diberikan dua macam sinyal *impuls*. Yaitu yang bernilai kecil (1 kJ) dan bernilai besar (5 kJ). Hasil yang diperoleh dari uji dengan sinyal ini adalah sebagai berikut.



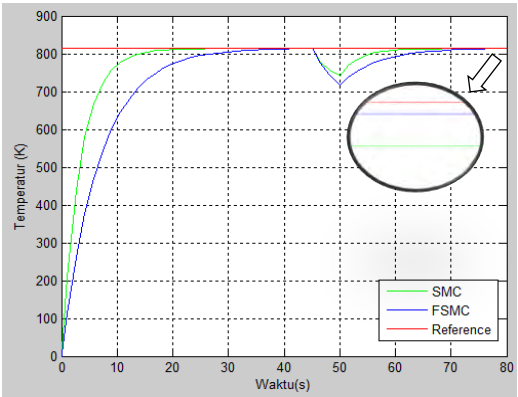
Gambar 9. Grafik Temperatur Uap dengan Sinyal *Impuls* 1 kJ



Gambar 10. Grafik Temperatur Uap dengan Sinyal *Impuls* 5 kJ

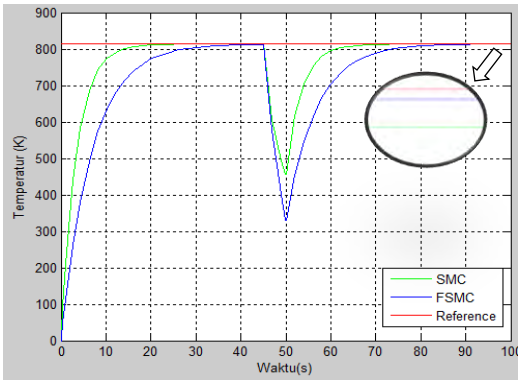
Dari Gambar 9 dan Gambar 10 nampak bahwa pada sistem dengan gangguan impuls kecil dan besar, pengendali SMC dan FSMC sama-sama memiliki respon yang cepat. Namun jika dilakukan pembesaran pada hasil simulasi diperoleh bahwa Pada Gambar 9 pengendali FSMC memiliki nilai *error* sebesar -0.114, pengendali SMC sebesar -0.5047. Sedangkan pada Gambar 10 pengendali FSMC memiliki nilai *error* sebesar -0.1136, pengendali SMC -0.5124. Pengendali FSMC dapat stabil disekitar 813.9 K sedangkan pengendali SMC stabil disekitar 813.5 K.

Pada sinyal *square*, yaitu sinyal yang bernilai tetap untuk selang waktu tertentu. Pada simulasi ini diberikan dua macam sinyal *square.* Yaitu yang bernilai kecil (1 kJ) dan bernilai besar (5 kJ). Hasil yang diperoleh dari uji dengan sinyal ini adalah sebagai berikut.



Gambar 11. Grafik Temperatur Uap dengan Sinyal *Square* 1 kJ

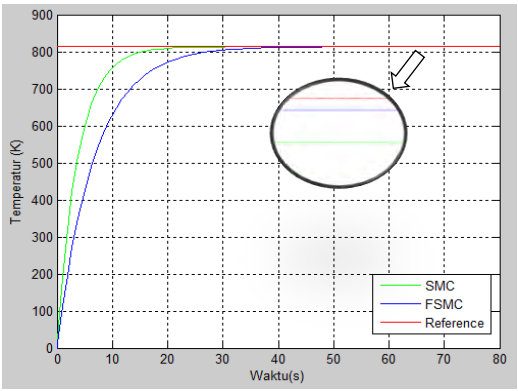
Pada Gambar 11 dan Gambar 12 terlihat bahwa pada sistem dengan gangguan *square* kecil maupun besar, pengendali FSMC masih memiliki respon yang lebih lambat daripada pengendali SMC. Namun jika dilakukan pembesaran pada hasil simulasi diperoleh bahwa pada Gambar 11, pengendali FSMC memiliki nilai *error* sebesar -0.118 sedangkan pengendali SMC memiliki nilai *error* sebesar -0.5126. Sedangkan pada Gambar 12, pengendali FSMC memiliki nilai *error* yang jauh lebih baik daripada SMC. Pengendali FSMC memiliki nilai *error* sebesar -0.1244 sedangkan pengendali SMC memiliki nilai *error* sebesar -0.5029. Pengendali FSMC dapat stabil disekitar 813.9 K sedangkan pengendali SMC stabil disekitar 813.5 K.



Gambar 12. Grafik Temperatur Uap dengan Sinyal *Square* 5 kJ

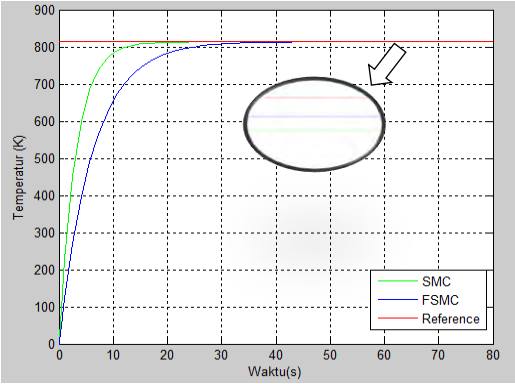
3.3 Simulasi dengan Gangguan Internal

Simulasi ini dilakukan dengan mengubah nilai parameter pada sistem *superheater* untuk menguji sensifitas sistem terhadap ketidakpastian dari dalam sistem. Parameter yang akan diubah adalah temperatur uap yang masuk, laju aliran massa yang masuk, laju aliran massa yang keluar dan kalor pembakaran pada *superheater*. Pengujian sistem pengendali terhadap gangguan internal ini dilakukan dengan memperbesar atau memperkecil nilai parameter sesuai batasan yang diberikan.



Gambar 13. Grafik Temperatur Uap dengan Parameter Diperkecil

Pada Gambar 13 terlihat bahwa pada sistem dengan parameter yang lebih kecil dari parameter awal, pengendali FSMC masih memiliki respon yang lebih lambat daripada pengendali SMC. Namun jika dilakukan pembesaran pada hasil simulasi diperoleh bahwa pengendali FSMC memiliki nilai *error* yang jauh lebih baik daripada SMC. Pengendali FSMC memiliki nilai *error* sebesar -0.1499 sedangkan pengendali SMC memiliki nilai *error* sebesar -0.5587. Pengendali FSMC dapat stabil disekitar 813.9 K sedangkan pengendali SMC stabil disekitar 813.5 K.



Gambar 14. Grafik Temperatur Uap dengan Parameter Diperbesar

Pada Gambar 14 terlihat bahwa pada sistem dengan parameter yang lebih besar dari parameter awal, pengendali FSMC masih memiliki respon yang lebih lambat daripada pengendali SMC. Namun jika dilakukan pembesaran pada hasil simulasi diperoleh bahwa pengendali FSMC memiliki nilai *error* yang lebih baik daripada SMC. Pengendali FSMC memiliki nilai *error* sebesar -0.0802 sedangkan pengendali SMC memiliki nilai *error* sebesar -0.1102. Pengendali FSMC dapat stabil disekitar 813.9 K sedangkan pengendali SMC stabil disekitar 813.8 K.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis dari hasil simulasi yang telah dilakukan yaitu diperoleh kesimpulan bahwa:

1. Rancangan pengendali FSMC pada sistem kendali temperatur uap *superheater* terdiri dari fungsi keanggotaan *fuzzy*, aturan *fuzzy*, dan susunan diagram blok dari sistem *superheater*. Rancangan pengendali FSMC dimulai dengan pembentukan fungsi switching S, yaitu:

   $S = \dot{\tilde{T}} + \lambda\tilde{T}$

   Dengan

   $\tilde{T} = T - T_d$

   $\dot{\tilde{T}} = \dot{T} - \dot{T_d}$

   Permukaan slidingnya adalah :

   $\dot{\tilde{T}} + \lambda\tilde{T} = 0$

   Setelah merancang bagian SMC, selanjutnya merancang bagian FLC, yaitu merancang fungsi keanggotaan dari s_p dan d.

$$S_p = \frac{|\dot{\tilde{T}} + \lambda\tilde{T}|}{\sqrt{1^2 + \lambda^2}}$$

$$d = \sqrt{\tilde{T}^2 - s_p^2}$$

2. Performansi sistem pengendalian temperatur uap *superheater* dengan metode FSMC menghasilkan temperatur uap dapat stabil disekitar 813.9 K baik tanpa gangguan maupun dengan gangguan eksternal dan internal. Angka ini sesuai dengan set point yang diharapkan yaitu 814 K. Sedangkan dengan pengendali SMC temperatur uap dapat stabil di sekitar 813.5 K. Jadi dapat dikatakan sistem pengendali FSMC mampu menghasilkan temperatur uap yang lebih akurat (*error* yang lebih kecil) dibandingkan dengan pengendali SMC. Selain itu, tingkat kerumitan dalam perancangan pengendali FSMC lebih sederhana dibandingkan dengan SMC.
   Namun terdapat kekurangan yang dimiliki pengendali FSMC, yaitu membutuhkan waktu yang lebih lama daripada pengendali SMC dan juga membutuhkan penelaan gain agar logika *fuzzy* dapat bekerja dengan baik.

Dengan melihat hasil yang diperoleh pada penelitian ini, hal yang penulis sarankan untuk pengembangan selanjutnya yaitu, pengujian sistem pengendali FSMC pada *superheater* mendapatkan hasil yang cukup baik , namun sebaiknya perlu dikaji lebih lanjut apabila dibandingkan dengan model *fuzzy* yang lain seperti model *fuzzy* Takagi Sugeno atau dengan menggunakan metode yang lain seperti *Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control* (T2FSMC).

DAFTAR PUSTAKA

[1] Herlambang, T (2010). "Desain Pengendalian Ketinggian Air dan Temperatur Uap pada Sistem Steam Drum *Boiler* dengan Metode Sliding Mode Control (SMC)". Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

[2] Stephanopoulos, George (1973). "Chemical Process Control". New Jersey : Prentice Hall.

[3] Mardlijah dkk. 2010."Design and Performance Analysis of Speed Controller in Induction Motor with Sliding Mode Control". Yogyakarta. Universitas Gadjah Mada.

[4] Ogata, Katshuiko. 2010. **Modern Control Engineering.** Prentice Hall Inc

[5] Tien, N.T. (2002). "Sliding Control*."* Applied Nonlinear Control. <URL: https://www2.hcmut.edu.vn/~nttien/Lectures/Applied%20nonlinear%20control/C.7%20Sliding%20Control.pdf>.

[6] Ross, Timothy J. 2010. ***Fuzzy* Logic with Engineering Application.** USA: University of New Mexico.

[7] Palm, R., Driankov, D., dan Hellendoorn, H. (1997). "Model Based *Fuzzy* Control : *Fuzzy* Gain Schedulers and Sliding Mode *Fuzzy* Controllers". Berlin: Springer-Verlag

[8] Septiani, Mardiana (2015). "Metode *Sliding Mode Control* (SMC) pada Sistem Temperatur Uap *Superheater* di PLTU 3-4 PT. PJB UP Gresik". Laporan Kerja Praktek Jurusan Matematika. Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

[9] Mardlijah dkk. 2007. "Disain Kontrol Posisi pada Panel Surya dengan Metode Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)". Jurnal Limit Matematika ITS. 2007. Vol 4 No. 2.