

KENDALI POLA PERUBAHAN SUHU OVEN BERBASIS ALGORITMA KENDALI LOGIKA SAMAR

Trismiyati^{*}, Widi Setiawan^{**}, Balza Achmad^{***}

^{*)} Polteknik Muhammadiyah - Yogyakarta

^{**)} P2PN - BATAN - Serpong

^{***)} Universitas Gadjah Mada - Yogyakarta

INTISARI

Pola perubahan suhu terhadap waktu pada proses perlakuan panas dalam oven sangat mempengaruhi struktur mikro dan sifat produk yang diinginkan. Dengan pendekatan logika samar, pengalaman dan cara berfikir operator dalam aksi kendali suhu dapat diwujudkan dalam bentuk aturan kendali. Oleh karena itu, sistem Kendali Logika Samar dapat digunakan sebagai salah satu alternatif untuk mengendalikan pola perubahan suhu oven. Penelitian ini bertujuan untuk membuat prototipe sistem kendali pola perubahan suhu oven berbasis algoritma Kendali Logika Samar. Penguat dorong-tarik, motor DC, dan sliding transformer digunakan sebagai aktuator. Unjuk kerja sistem kendali diuji dan dianalisis dalam domain waktu.

Pengujian sistem kendali menghasilkan overshoot semakin besar dengan semakin tingginya masukan tangga. Pengujian menunjukkan overshoot 4,008% untuk 80 °C, 4,792% untuk 100 °C, dan 6,386% untuk 120 °C. Semakin besar kecepatan suhu yang diinginkan maka semakin besar pula kesalahan tunak suhu ke/uaran oven. Hal ini dapat disebabkan oleh keterbatasan sistem oven yang memiliki konstanta waktu 240,865 detik.

Kata kunci : suhu oven, waktu, Kendali Logika Samar, sliding transformer.

PENDAHULUAN

Dalam industri bahan, sistem kendali suhu oven diperlukan dalam proses perlakuan panas (*heat treatment*) bahan. Perilaku suhu terhadap waktu sangat mempengaruhi struktur mikro dan sifat produk yang diinginkan.

Pada umumnya kendali suhu furnace menggunakan pendekatan PID (*Proportional-Integral-Derivative*). Namun pendekatan ini tidak dapat mengatasi ketidaklinearan sistem, melainkan hanya efektif untuk lingkungan tertentu (Yan *et al*, 1994). Selain itu pendekatan kendali PID memiliki *overstrikes* yang mempengaruhi bentuk produk, contohnya pada bentuk glass (Karisola, 1999). Pengalaman operator dalam mengubah target suhu juga tidak dapat diterapkan secara otomatis, sehingga harus dilakukan secara manual.

Kendali Logika Samar (KLS) merupakan pendekatan alternatif dalam penyelesaian masalah tersebut. Pendekatan ini dapat dikembangkan pada perancangan sistem kendali linear maupun nonlinear. Berdasarkan keunggulan KLS dalam berbagai aplikasi terutama pengalaman dan cara berfikir operator dalam aksi kendali dapat diwujudkan dalam bentuk aturan kendali, maka dilakukan penelitian dalam ruang lingkup rancang bangun kendali pola perubahan suhu oven berbasis algoritma Kendali Logika Samar.

Program kendali pola perubahan suhu oven menggunakan algoritma kendali logika samar dengan bahasa C. Pola perubahan suhu yang diinginkan berupa persamaan linear suhu terhadap waktu. Objek kendali dalam penelitian ini adalah oven yang disimulasikan dengan elemen pemanas elektrik. Variabel KLS terdiri dari masukan kesalahan suhu dan laju kesalahan suhu serta keluaran berupa perubahan tegangan sliding transformer terhadap tegangan referensi.

Pengujian unjuk kerja sistem kendali pola suhu oven dilakukan dalam domain waktu (respon tangga, respon ramp, dan respon trayektori). Data-data hasil pengujian diolah dengan perangkat lunak Microsoft Office XP dan Matlab versi 6 Release 13.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat dimanfaatkan dalam proses perlakuan panas (*heat treatment*) suatu bahan. Misalkan untuk pembuatan keramik, pellet bahan bakar reaktor nuklir.

PERANCANGAN

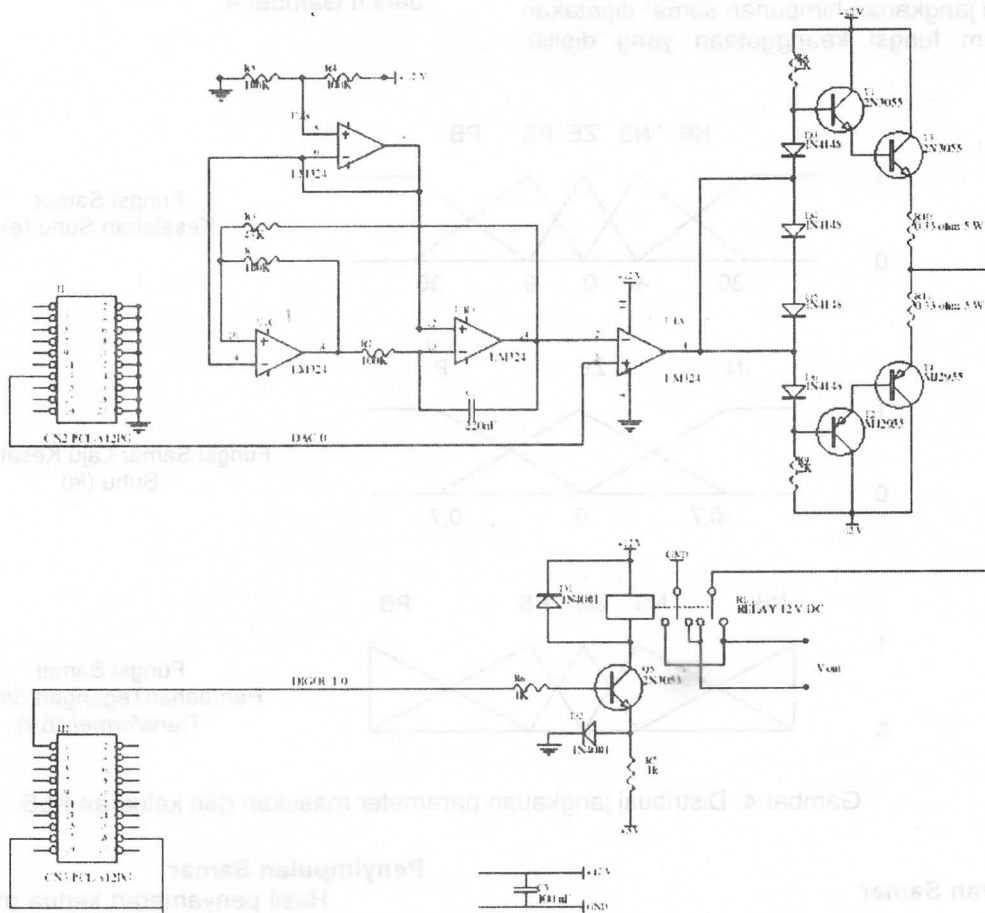
Perancangan Sistem Kendali Pola Perubahan Suhu Oven

Diagram blok sistem kendali penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.

Perancangan Driver Motor DC

Rangkaian driver motor DC dirancang untuk dapat mengendalikan kecepatan dan posisi motor DC searah maupun berlawanan dengan arah gerak

jarum jam. Rangkaian ini terdiri dari rangkaian osilator segitiga, komparator dan penguat dorong-tarik serta driver relay. Rangkaian keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Driver motor DC

Rancang Bangun Program Kendali Pola Perubahan Suhu Oven Berbasis Algoritma Kendali Logika Samar

Masukan sistem kendali pola perubahan suhu oven berupa kesalahan suhu (e) dan laju kesalahan suhu (le). Keluaran sistem berupa perubahan tegangan sliding transformer (ΔV) terhadap tegangan referensi pembangkit suhu oven. Kesalahan suhu didefinisikan sebagai selisih antara suhu yang diinginkan (ds) dengan suhu riil oven (sr), sedangkan laju kesalahan suhu sebagai selisih kesalahan suhu saat ini $e[nT]$ dengan kesalahan suhu sebelumnya $e[nT-T]$ tiap detik.

Penentuan Semesta Pembicaraan dan Himpunan Samar

Semesta pembicaraan dalam kendali logika samar ditentukan berdasarkan kemungkinan nilai crisp yang akan muncul. Nilai ini diperoleh dari eksperimen. Ketika suhu oven telah mencapai suhu yang diinginkan, dengan jangkauan kesalahan suhu yang ditetapkan diharapkan tidak menyebabkan terjadinya overshoot. Jangkauan laju kesalahan suhu ditentukan dalam jangkauan nilai yang sering muncul, sedangkan jangkauan parameter

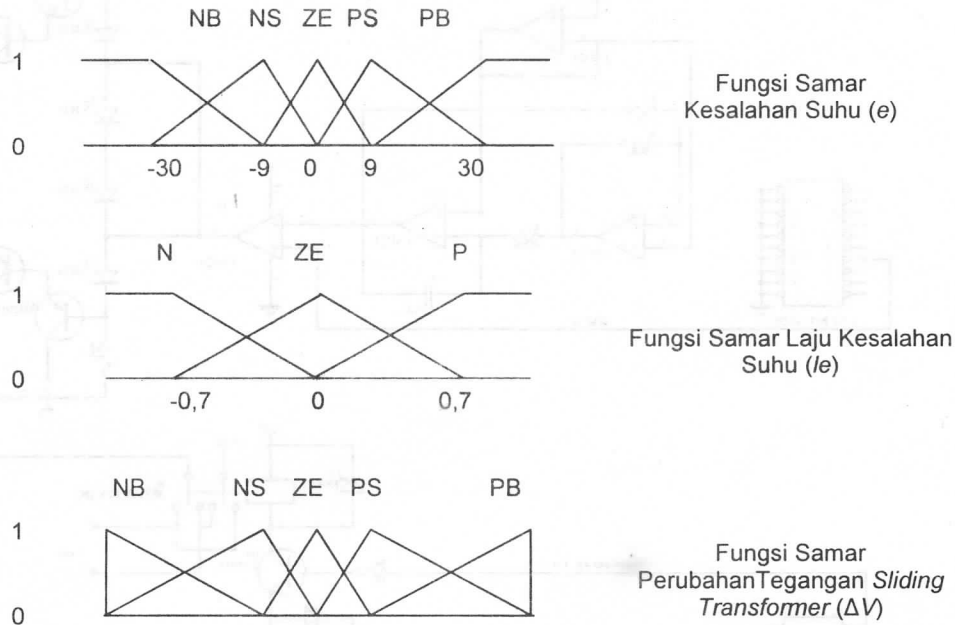
perubahan tegangan *sliding transformer* diperoleh dengan pendekatan. Parameter kesalahan suhu dan perubahan tegangan *sliding transformer* dibagi dalam

Penyamaran

Nilai jangkauan himpunan samar dipetakan dalam fungsi keanggotaan yang dipilih.

lima himpunan samar. Laju kesalahan suhu dibagi dalam tiga himpunan samar.

Distribusi jangkauan parameter masukan dan keluaran KLS penelitian ini ditunjukkan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Distribusi jangkauan parameter masukan dan keluaran KLS

Aturan Samar

Penalaran hubungan kedua parameter masukan diperoleh dari eksperimen. Hasilnya digunakan untuk memperoleh aksi kendali. Penalaran ini ditabulasi dalam basis aturan (*Fuzzy Associative Memory*). Gambar 5 menunjukkan basis aturan untuk sistem kendali pola perubahan suhu oven.

Penyimpulan Samar

Hasil penyamaran kedua masukan KLS selanjutnya disimpulkan dengan metode MAX-MIN. Penyimpulan operasi MIN dilakukan di antara anteseden. Penyimpulan ini melibatkan basis aturan yang telah dibuat. Penyimpulan operasi MAX dilakukan di antara konsekuen. Hasil penyimpulan operasi MAX selanjutnya digunakan untuk pentaksamaran dengan metode *Center of Gravity* (COG).

Kesalahan suhu

| | NB | NS | ZE | PS | PB |
|----|----|----|----|----|----|
| N | NB | NS | NS | ZE | PB |
| ZE | NB | NS | ZE | PS | PB |
| P | NB | ZE | PS | PS | PB |

Gambar 5. Basis aturan samar

Pentaksamaran

Nilai linguistik hasil evaluasi dari aturan samar diubah ke nilai *crisp* dengan menggunakan metode *Center of Gravity* (COG). Metode ini dipilih karena menghasilkan aksi kendali yang halus.

$$COG = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i u_i}{\sum_{i=1}^N \mu_i} \quad (1)$$

dengan COG : keluaran sistem kendali, μ_i : derajat keanggotaan ke- i dan u_i : titik berat nilai linguistik ke- i

Tegangan keluaran *sliding transformer* ke *oven* diperoleh dari perhitungan

$$V(nT) = V_{ref}(ds, nT) + \Delta V(nT) \quad (2)$$

V_{ref} diperoleh dari persamaan hubungan tegangan dengan suhu yang dihasilkan dari elemen pemanas elektrik.

Aksi kendali ke driver motor DC merupakan konversi nilai V ke waktu hidup motor DC. Waktu hidup ditetapkan 100% siklus kerja dan waktu mati motor DC ditetapkan 0% siklus kerja PWM.

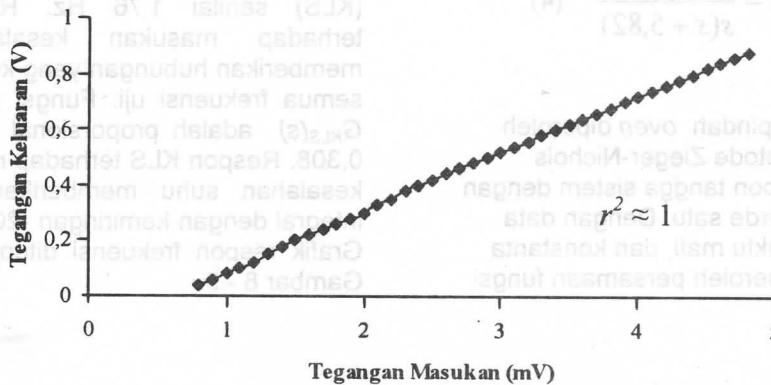
PENGUJIAN DAN ANALISA

Penguat DC Termokopel

Pengujian menunjukkan bahwa korelasi linear antara tegangan masukan dan keluaran penguat DC termokopel (Gambar 6) dinyatakan dengan persamaan :

$$V_o = 209,97V_i - 0,12 \quad (3)$$

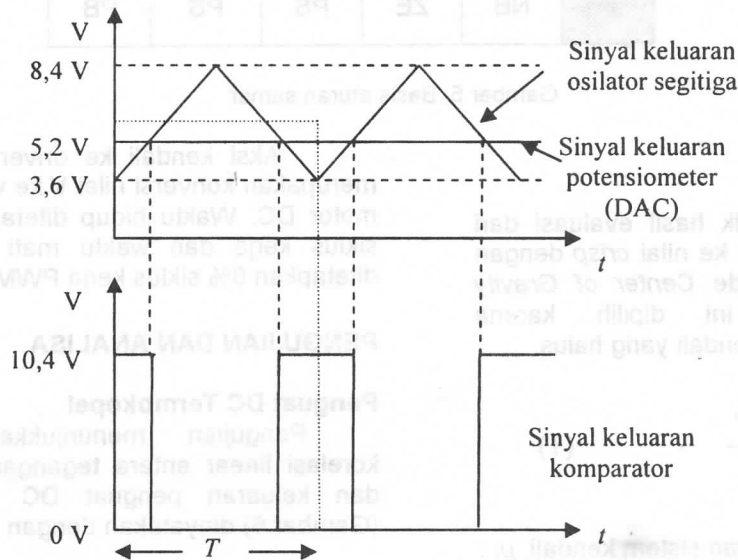
Karena data diasumsikan mengikuti distribusi Gauss dan limit 99,7% ($\pm 3s$), maka diperoleh penguatan $m = 209,97 \pm 3,09$ dan tegangan *offset* terkuatkan $b = 0,12 \pm 0,01$ V.



Driver Motor DC

Driver motor DC memiliki keluaran sinyal persegi 24,178 Hz dengan tegangan minimum 0 V dan maksimum 10,4 V ketika DIGOUT0 bernilai 0 (0,1 V) dan tegangan minimum -10,4 V dan minimum 0 V ketika DIGOUT0 bernilai 1 (4,8 V). Relay

membutuhkan waktu sekitar 0,214 detik untuk memperoleh tegangan keluaran yang stabil ketika terjadi perubahan polaritas tegangan. Gambar sinyal keluaran driver motor DC ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Sinyal keluaran driver motor DC

Rangkaian Aktuator

Rangkaian aktuator terdiri dari penguat dorong-tarik, motor DC, dan sliding transformer. Hasil pengujian respon frekuensi menghasilkan persamaan fungsi pindah aktuator :

$$G_{aktuator}(s) = \frac{5,82}{s(s + 5,82)} \quad (4)$$

Oven

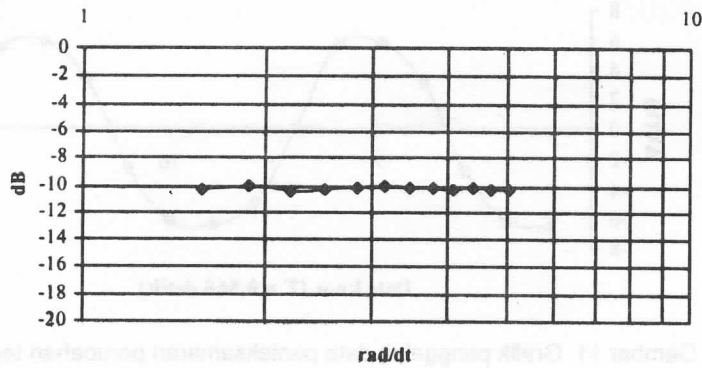
Fungsi pindah oven diperoleh dengan metode Zieger-Nichols berdasarkan respon tangga sistem dengan pendekatan orde satu. Dengan data penguatan, waktu mati, dan konstanta waktu, maka diperoleh persamaan fungsi

pindah oven adalah

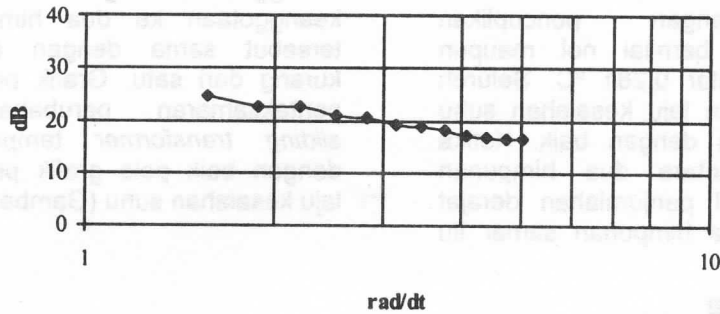
$$G_{oven}(s) = \frac{0,005e^{-43,424s}}{(1 + 240,864s)} \quad (5)$$

KLS

Frekuensi pencuplikan pengujian respon frekuensi Kendali Logika Samar (KLS) senilai 1,76 Hz. Respon KLS terhadap masukan kesalahan suhu memberikan hubungan yang konstan untuk semua frekuensi uji. Fungsi pindah KLS, $G_{KLS}(s)$ adalah proporsional dengan nilai 0,308. Respon KLS terhadap masukan laju kesalahan suhu memberikan hubungan integral dengan kemiringan -20 dB/dekade. Grafik respon frekuensi ditunjukkan pada Gambar 8 - 9.



Gambar 8. Grafik respon frekuensi KLS terhadap masukan kesalahan suhu



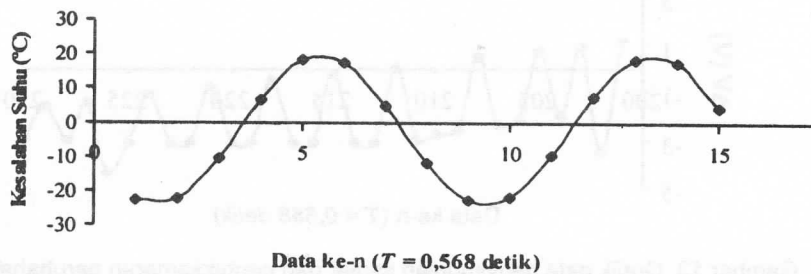
Gambar 9. Grafik respon frekuensi KLS terhadap masukan laju kesalahan suhu

Analisa KLS

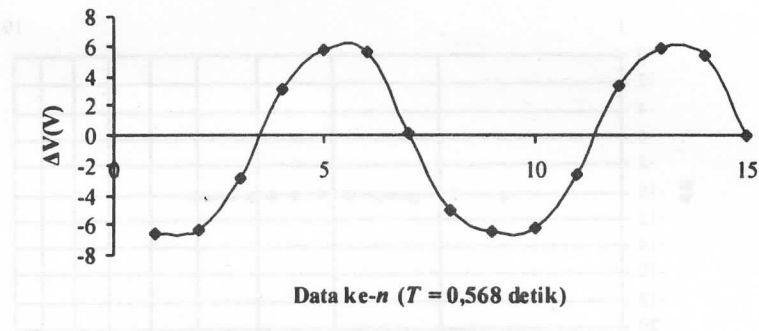
Hasil analisa penggalan data respon frekuensi 0,3 Hz menunjukkan bahwa resolusi penyamaran kesalahan suhu dan laju kesalahan suhu baik. Ketika terjadi *overlap* antara dua himpunan keanggotaan menghasilkan jumlah derajat keanggotaan kedua himpunan samar itu bernilai satu. Hasil penyimpulan samar menunjukkan bahwa jumlah derajat

keanggotaan dua himpunan samar yang *overlap*, dapat bernilai satu maupun kurang dari satu.

Jika grafik data kesalahan suhu (Gambar 10) dibandingkan dengan grafik data pentaksamaran (Gambar 11), maka terlihat keluaran KLS cukup mengikuti dengan baik adanya perubahan masukan kesalahan suhu.



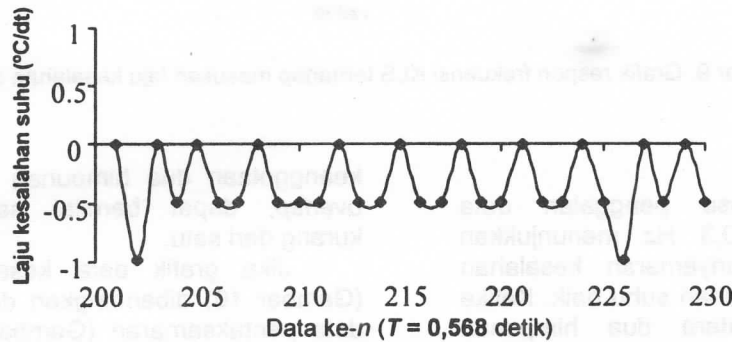
Gambar 10. Grafik penggalan data kesalahan suhu 0,3 Hz



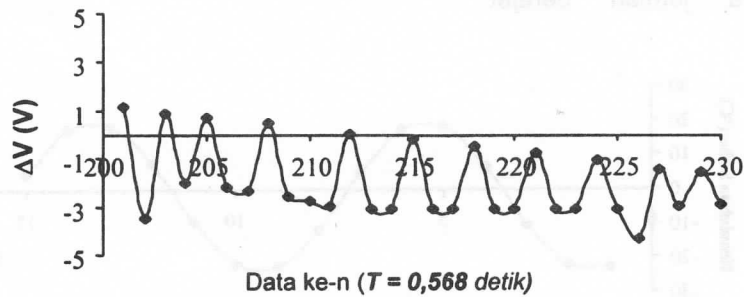
Gambar 11. Grafik penggalan data pentaksamaran perubahan tegangan *sliding transformer* 0,3 Hz keluaran KLS

Analisa selanjutnya dilakukan terhadap KLS sistem kalang terbuka. Perubahan kesalahan suhu dari satu pencuplikan dengan pencuplikan berikutnya dapat bernilai nol maupun kelipatan dari sekitar $0,281$ °C. Seluruh data kesalahan dan laju kesalahan suhu dapat tersamarkan dengan baik. Ketika terjadi *overlap* antara dua himpunan keanggotaan, hasil penjumlahan derajat keanggotaan kedua himpunan samar itu bernilai satu.

Penyimpulan samar menunjukkan adanya *overlap* antara dua himpunan keanggotaan, menghasilkan jumlah derajat keanggotaan ke dua himpunan samar tersebut sama dengan satu maupun kurang dari satu. Grafik penggalan data pentaksamaran perubahan tegangan *sliding transformer* tampak mengikuti dengan baik pola grafik penggalan data laju kesalahan suhu (Gambar 12 -13).



Gambar 12. Grafik penggalan data laju kesalahan suhu dalam proses kalang terbuka

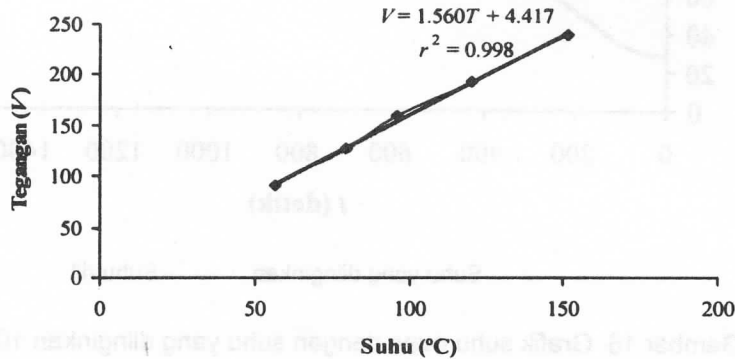


Gambar 13. Grafik data penyimpulan samar dan pentaksamaran perubahan tegangan *sliding transformer* keluaran KLS

Referensi Keluaran Kendali

yang dapat dicapai elemen pemanas elektrik yang digunakan (Gambar 14).

Berikut grafik data tegangan *sliding transformer* dengan suhu maksimal



Gambar 14. Grafik korelasi data tegangan *sliding transformer* dengan suhu maksimal yang dihasilkan elemen pemanas elektrik

Dari grafik data di atas diperoleh persamaan korelasi

$$V = 1,560 ds + 4,417 \quad (6)$$

dan $r^2 = 0,998$

dengan ds adalah suhu maksimal yang dihasilkan elemen pemanas elektrik. Persamaan 6 ini digunakan sebagai pengatur tegangan referensi keluaran KLS

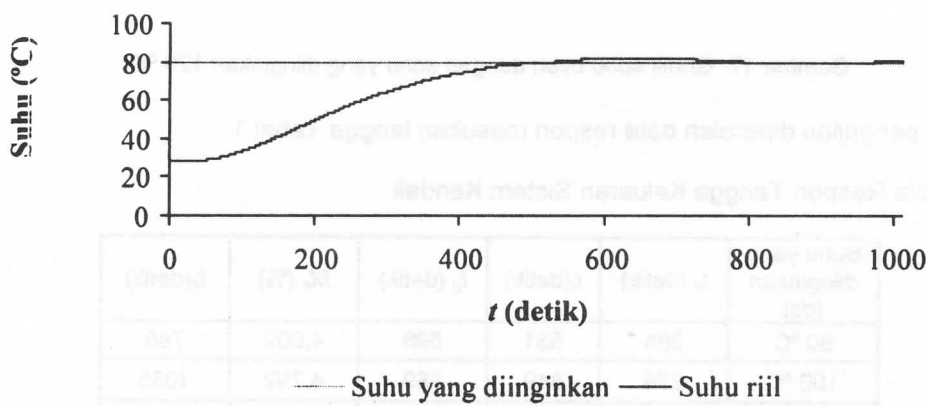
dalam menentukan tegangan *sliding transformer* keluaran sistem kendali.

Analisa Sistem Kendali Pola Perubahan Suhu Oven

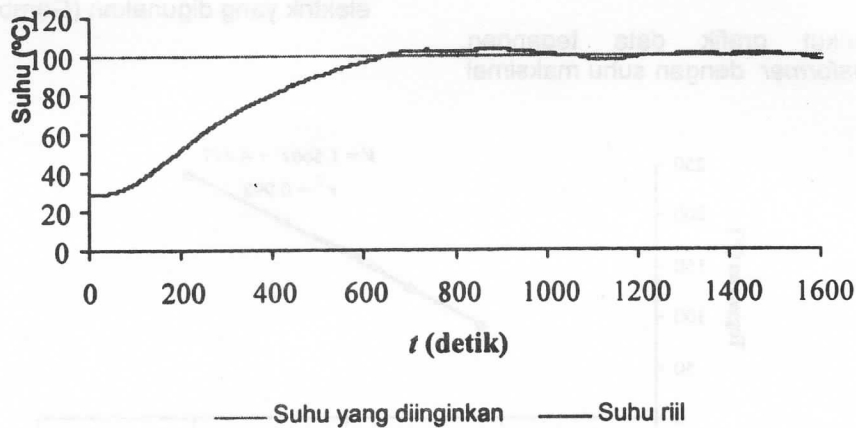
Pengujian ini terdiri dari pengujian dengan masukan tangga, *ramp*, dan trayektori.

Masukan Tangga

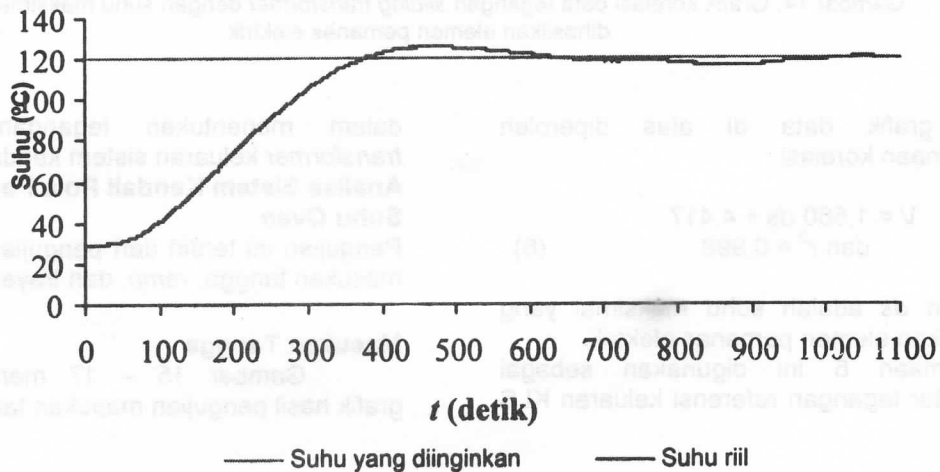
Gambar 15 – 17 menunjukkan grafik hasil pengujian masukan tangga.



Gambar 15. Grafik suhu oven dengan suhu yang diinginkan 80 °C



Gambar 16. Grafik suhu oven dengan suhu yang diinginkan 100 °C



Gambar 17. Grafik suhu oven dengan suhu yang diinginkan 120 °C

Dari ketiga pengujian diperoleh data respon masukan tangga Tabel 1.

Tabel 1. Data Respon Tangga Keluaran Sistem Kendali

| Suhu yang diinginkan (ds) | t_d (detik) | t_r (detik) | t_p (detik) | M_p (%) | t_s (detik) |
|---------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------|---------------|
| 80 °C | 265 | 531 | 596 | 4,009 | 788 |
| 100 °C | 276 | 649 | 889 | 4,792 | 1035 |
| 120 °C | 202 | 375 | 461 | 6,386 | 639 |

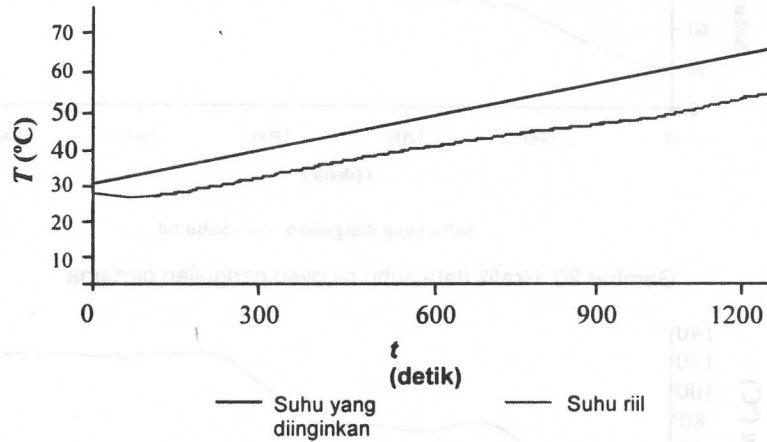
Data respon tangga di muka menunjukkan bahwa untuk mencapai suhu 2% di sekitar suhu yang diinginkan, maka dibutuhkan waktu lebih dari 10 menit. *Overshoot*

meningkat dengan meningkatnya suhu tetap yang diinginkan.

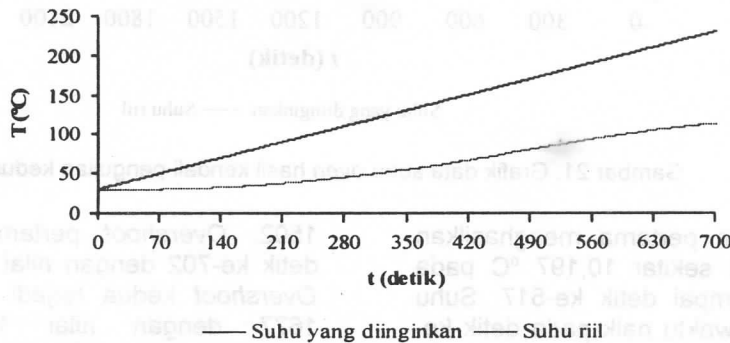
Masukan Ramp

Pengujian dilakukan dengan kecepatan suhu masukan yang diinginkan 0,0286 °C/detik dan 0,286 °C/detik. Grafik

data hasil pengujian ditunjukkan oleh Gambar 18 – 19.



Gambar 18. Grafik suhu riil dengan suhu yang diinginkan berkecepatan 0,0286 °C/detik



Gambar 19. Grafik suhu riil dengan suhu yang diinginkan berkecepatan 0,286 °C/detik

Pengujian sistem kendali dengan masukan suhu yang diinginkan berkecepatan 0,0286 °C/dt menghasilkan kesalahan tunak sekitar 4,825 °C pada detik ke-200 sampai detik ke-550. Pada detik selanjutnya, kesalahan suhu terus meningkat dan pada detik ke-1100 sampai ke-1200 kesalahan suhu relatif stabil dengan nilai sekitar 8,278 °C.

Pengujian sistem kendali dengan masukan suhu yang diinginkan berkecepatan 0,286 °C/dt menghasilkan kesalahan suhu yang terus meningkat dengan berjalannya waktu. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan sistem *oven* yang memiliki konstanta waktu 240,864 detik.

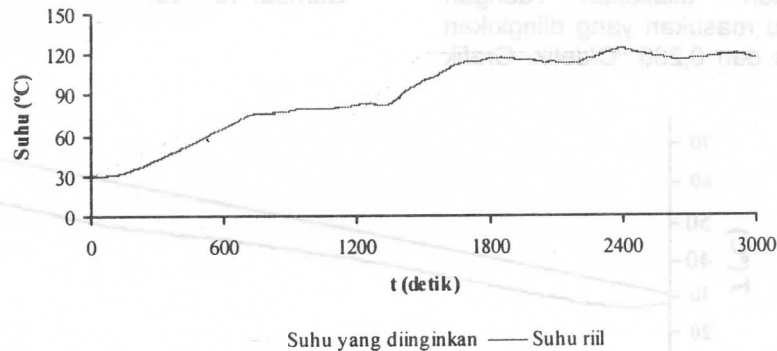
Berdasarkan hasil pengujian masukan *ramp*, maka sistem kendali ini dapat digunakan dengan baik untuk suhu yang diinginkan berkecepatan rendah kurang dari 0,0286 °C/dt.

Masukan Trayektori

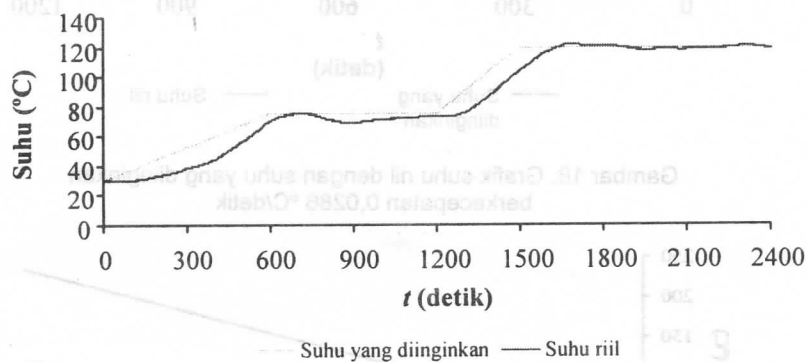
Pengujian sistem kendali dilakukan terhadap masukan trayektori $ds(t)$ dengan t adalah waktu dalam detik.

$$= \begin{cases} 30 + (t * 0,075) & \text{untuk } t < 600 \\ 75 & \text{untuk } 600 \leq t < 1200 \\ 75 + (t - 1200) * 0,15 & \text{untuk } 1200 \leq t < 1500 \\ 120 & \text{untuk } t \geq 1500 \end{cases} \quad (7)$$

Grafik respon masukan trayektori ditunjukkan pada Gambar 20 – 21.



Gambar 20. Grafik data suhu riil oven pengujian pertama



Gambar 21. Grafik data suhu oven hasil kendali pengujian kedua

Pengujian pertama menghasilkan kesalahan tunak sekitar $10,197^{\circ}\text{C}$ pada detik ke-216 sampai detik ke-517. Suhu oven mencapai waktu naik pada detik ke-719 dengan suhu $75,100^{\circ}\text{C}$. *Overshoot* terjadi pada detik ke-1200 senilai $16,058\%$. *Overshoot* kedua senilai $3,129\%$ pada detik ke-2400. Sampai akhir proses pengujian, kesalahan suhu maksimal dapat mencapai $4,454^{\circ}\text{C}$.

Pengujian kedua menghasilkan kesalahan tunak sekitar $1,747^{\circ}\text{C}$ pada detik ke-1043 sampai ke-1093, $2,027^{\circ}\text{C}$ pada detik ke-1094 sampai ke-1110, dan $16,265^{\circ}\text{C}$ pada detik ke-1328 sampai ke-

1502. *Overshoot* pertama terjadi pada detik ke-702 dengan nilai sekitar $1,454\%$. *Overshoot* kedua terjadi pada detik ke-1677 dengan nilai $1,989\%$. Waktu penetapan diperoleh pada detik ke-2290 dengan kesalahan sekitar $1,347\%$.

Pengujian sistem kendali dengan masukan trayektori menghasilkan pola perubahan suhu yang relatif dapat mengikuti masukan. Perbedaan respon trayektori dengan masukan yang sama dapat disebabkan oleh keterbatasan sistem mekanik aktuator dan perbedaan kondisi lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

1. KARISOLA, J., December 1999, U.S. *Glass Magazine: Fuzzy Logic Reshapes Bending Techniques*, Vol 34, Number 12, www.usglassmag.com/backissues/9912/9992x%20bit%20fuzzy.html.
2. YAN, J., RYAN, M., Power, J., 1994, *Using Fuzzy Logic : Toward Intelligence System*, Prentice Hall, USA.