

Pengujian Sistem Kontrol Pemanas Udara dan Simulasi Pengaruh Hambatan Termal Elemen Pemanas terhadap Respon

Engkos Achmad Kosasih

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Kampus Baru UI Depok 16424

e-mail :kosri@eng.ui.ac.id

Abstrak

Umumnya analisis respon aksi kontroler PID pemanas udara dilakukan dengan metode kotak hitam, artinya variabel-variabel di dalam pemanas udara seperti hambatan termal elemen pemanas, tidak diikuti sertakan dalam perhitungan. Namun dalam kenyataannya, fin pada elemen pemanas mempengaruhi respon kontroler. Selain hambatan termal elemen pemanas, heat loss atau kalor yang terbuang kelingkungan juga harus dimasukkan kedalam perhitungan, karena pada kenyataannya tidak ada isolator yang mampu memberikan hambatan termal tak terhingga atau tanpa heat loss.

Kata kunci: control, PID controller, air heater

1. Pendahuluan

Kontrol otomatis telah memegang peranan yang penting dalam bidang industri. Beberapa fungsi kontrol otomatis adalah sebagai pengontrol proses dan instrumen keselamatan. Penggunaan kontrol otomatis memiliki keuntungan meliputi operasi yang lebih stabil, kemudahan dalam mendapatkan performa dari sistem mekanik, mengeliminasi pekerjaan manusia dan meningkatkan faktor keselamatan.

Terdapat berbagai macam aksi kontrol suatu kontroler, seperti dua posisi atau on-off, aksi kontrol integral, aksi kontrol turunan dan aksi kontrol proporsional. Umumnya aksi kontrol yang banyak digunakan adalah aksi kontrol derivatif ditambah integral ditambah turunan. Aksi kontrol ini memiliki keuntungan menghilangkan offset dan mempercepat respon.

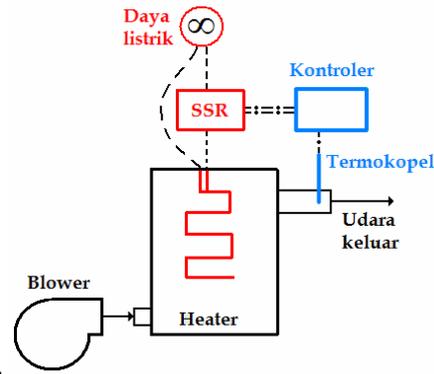
Penggunaan kontrol otomatis dalam sistem termal telah banyak dijumpai, seperti sistem kontrol untuk mengontrol temperatur fluida yang keluar dari pemanas udara. Pemilihan sistem kontrol yang tepat, didasari dari karakteristik sistem termal yang akan dikontrol. Oleh sebab itu, pengetahuan akan karakteristik suatu sistem yang akan dikontrol menjadi sangat penting. Kesalahan dalam menetapkan konstanta kontroler akan berakibat sistem lamban atau bahkan tidak stabil.

Umumnya analisis respon kontroler pemanas udara dilakukan dengan metode kotak hitam, artinya variabel-variabel di dalam pemanas udara seperti hambatan termal elemen pemanas, tidak diikuti sertakan dalam perhitungan. Namun dalam kenyataannya, fin pada elemen pemanas juga mempengaruhi respon kontroler. Hal ini terlihat pada heater dengan elemen pemanas memiliki fin, waktu stabilnya lebih cepat dari pada elemen pemanas tanpa fin yang digunakan dalam pengujian ini. Sehingga fin di elemen pemanas memberikan efek terhadap karakteristik respon kontrol heater dan harus diikutsertakan dalam perhitungan respon kontroler pemanas udara.

Selain hambatan termal elemen pemanas, heat loss atau kalor yang terbuang kelingkungan juga harus dimasukkan kedalam perhitungan, karena pada kenyataannya tidak ada isolator yang mampu memberikan hambatan termal tak terhingga atau tanpa heat loss.

2. Pengujian Respon Kontroler

Prinsip kerja sistem ini secara garis besar adalah udara dikompresi oleh blower sehingga mengalir ke pemanas udara. Besarnya laju udara diatur oleh bukaan katup dari blower, kemudian diukur dengan menggunakan orifis yang diletakan diantara blower dengan heater. Massa aliran udara yang berasal dari blower masuk ke dalam air heater dengan temperatur masuk sama dengan temperatur ruang (29 °C)

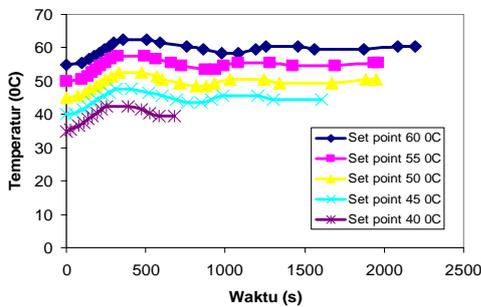


Gambar 1. Rangkaian unit pengujian

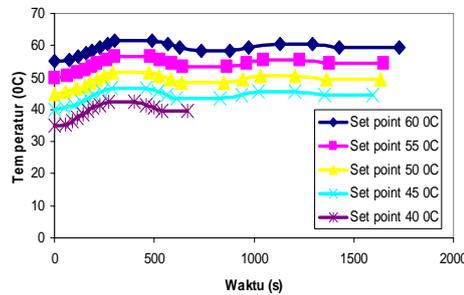
Karena perbedaan temperatur elemen pemanas dan udara, maka terjadi perpindahan panas dari elemen pemanas ke udara. Besarnya temperatur elemen pemanas bergantung dari energi listrik yang disuplai ke elemen pemanas. Udara yang telah naik temperaturnya keluar dari pemanas udara melalui sisi keluar yang terletak dibagian atas selimut tabung.

Nilai temperatur udara keluar ini diukur oleh termokopel, dan nilai ini menjadi feedback untuk kontroler. Kontroler akan menghitung perbedaan temperatur yang terukur dan temperatur yang diset atau diinginkan. Apabila terjadi perbedaan maka akan dibangkitkan sinyal kesalahan kepada kontroler. Error ini menjadi dasar kontroler untuk mengontrol suplai listrik, dengan cara mengatur arus listrik yang masuk ke solid state relay (SSR). Arus listrik dari kontroler mengontrol besarnya daya listrik yang dilepas SSR untuk elemen pemanas.

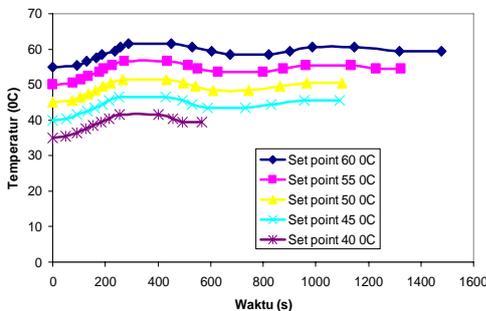
Pengujian dilakukan dengan memvariasikan laju udara ke dalam heater dan set point temperatur udara keluar heater. Hasil yang didapat adalah grafik respon kontroler berupa perubahan temperatur keluar heater sebagai fungsi waktu.



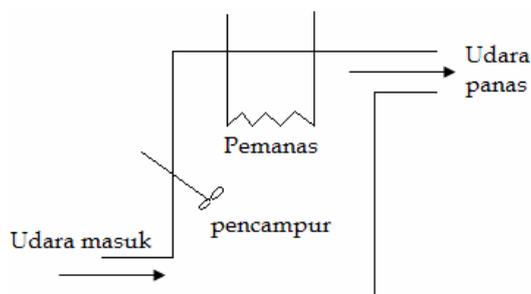
Gambar 2. Respon, laju udara 17,7 g/s



Gambar 3. Respon, laju udara 25.1 g/s



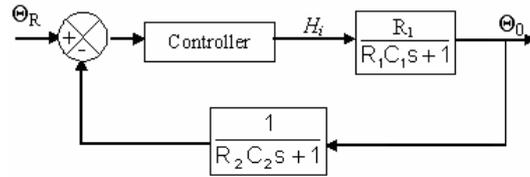
Gambar 4. Respon, laju udara 30,7 g/s



Gambar 5. Skema sistem termal pemanas udara

3. Respon Sistem dengan Metode Kotak Hitam

Pada sistem gb.5, diasumsikan temperatur udara dalam tangki seragam, dan temperatur udara masuk konstan. Diagram blok sistem kontrol pemanas udara tersebut adalah sebagai berikut :



Gambar 6. Diagram blok sistem kontrol *air heater*

- ❑ Fungsi alih kontrolernya adalah

$$K(s) = K_p + \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1)$$

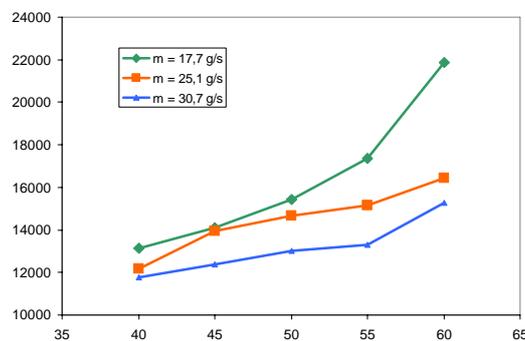
$$R_1 = \frac{1}{\dot{m} c_p} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{1}{h.A} \quad (3)$$

dengan:

- ❑ K_p adalah penguatan proporsional
- ❑ T_i adalah waktu integral
- ❑ T_d adalah waktu derivatif
- ❑ \dot{m} adalah laju udara
- ❑ c_p adalah kalor spesifik udara
- ❑ C_1 adalah kapasitas kalor gabungan elemen pemanas, udara dan dinding tabung.
- ❑ h adalah koefisien konveksi udara-termokopel
- ❑ A adalah luas permukaan termokopel
- ❑ C_2 adalah kapasitas kalor termokopel
- ❑ Θ_R adalah temperatur set point
- ❑ Θ_O adalah temperatur udara keluar

Dengan mengetahui semua nilai variabel diatas, maka suatu respon sistem kontrol dapat diprediksi. Pada pengujian ini semua nilai variabel telah diketahui dan dapat didekati kecuali C_1 , maka kemudian dilakukan iterasi terhadap nilai C_1 sehingga didapat grafik respon literatur yang mendekati grafik respon percobaan. Hasilnya untuk setiap data adalah sebagai berikut :



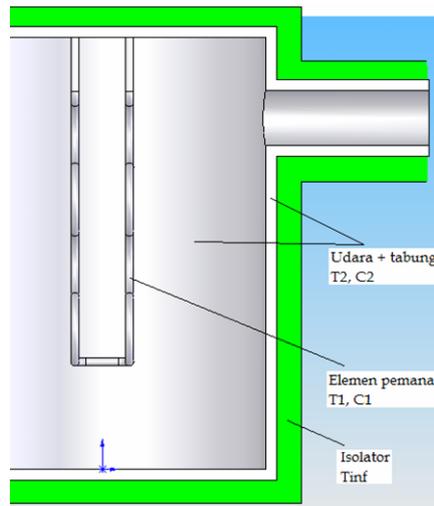
Gambar 7. Kapasitas kalor sistem

Sumbu Y adalah C_1 (J/K) dan sumbu X adalah set point ($^{\circ}C$). Pada grafik diatas terlihat nilai C_1 akan naik apabila set point naik. Namun nilai C_1 juga dipengaruhi oleh laju udara. Hal ini karena persamaan yang digunakan dalam menentukan respon kontrol secara literatur adalah secara kotak hitam atau tidak memasukan unsur hambatan termal elemen pemanas, kalor yang hilang kelingkungan dan perbedaan

temperatur disetiap titik di heater. Nilai-nilai ini diakumulasi kedalam kapasitas kalor sistem dan juga menjadi penyebab adanya error antara grafik literatur dengan grafik percobaan.

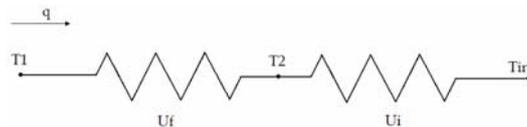
4. Respon Sistem dengan Metode Pembahasan Detail

Pada bagian ini akan disusun persamaan-persamaan yang memasukan unsur-unsur hambatan termal elemen pemanas dan heat loss pada suatu respon sistem kontrol pemanas udara. Beberapa asumsi tetap digunakan yaitu temperatur udara didalam tabung dan dinding tabung dianggap sama (kapasitas kalor gabungan) dan juga heat loss yang diterima isolator tidak menyebabkan temperatur isolator naik (benda padat tak berhingga) sehingga temperatur isolator dianggap tetap sama dengan temperatur ruang.



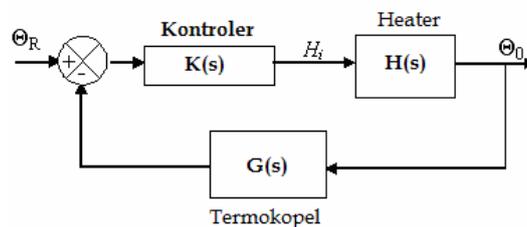
Gambar 8. Potongan melintang heater

Rangkaian perpindahan kalor dalam arah satu dimensinya adalah sebagai berikut

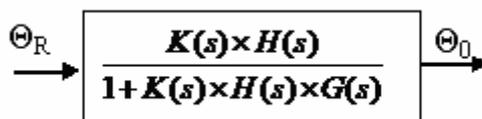


Gambar 9. Rangkaian hambatan termal

Sehingga diagram blok kontrol sistem air heaternya dengan penambahan unsur heat loss dan faktor termal konveksi elemen pemanas-udara, adalah sebagai berikut



Gambar 10. Diagram blok sistem kontrol air heater



Gambar 11. Diagram fungsi alih sistem kontrol air heater

$$K(s) = K_p + \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4)$$

$$H(s) = \frac{1}{\left(\frac{C_1 C_2 s^2}{U_f} + \left(C_2 s + C_1 \left(\frac{U_f + U_i + \dot{m} c_p}{U_f} \right) \right) s + U_i + \dot{m} c_p \right)} \quad (5)$$

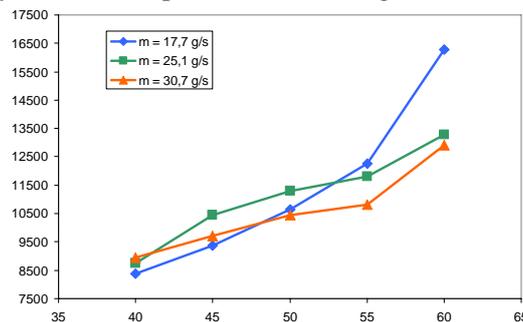
$$G(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (6)$$

- ❑ C_1 adalah kapasitas kalor elemen pemanas
- ❑ C_2 adalah kapasitas kalor gabungan udara dan dinding tabung
- ❑ U_f adalah faktor konveksi elemen pemanas yang besarnya sama dengan $h.A$, dimanas h adalah koefisien konveksi elemen pemanas dan A adalah luas permukaan elemen pemanas.
- ❑ U_i adalah faktor kkonduksi isolatar,

$$U_i = \frac{kA}{L} \quad (7)$$

- ❑ k adalah koefisien konduksi isolator
- ❑ A adalah luas penampang isolator
- ❑ L adalah ketebalan isolator

Kemudian dilakukan iterasi terhadap nilai C_2 dan U_i sehingga didapat grafik respon literatur yang mendekati percobaan, hasilnya untuk setiap data adalah sebagai berikut :

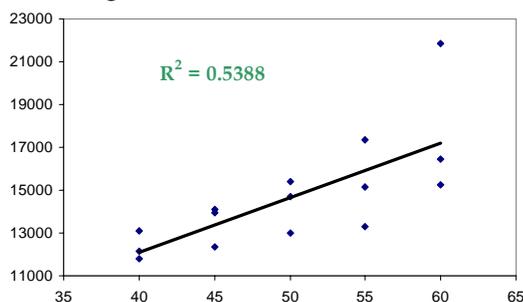


Gambar 12. Kapasitas kalor udara dan tabung

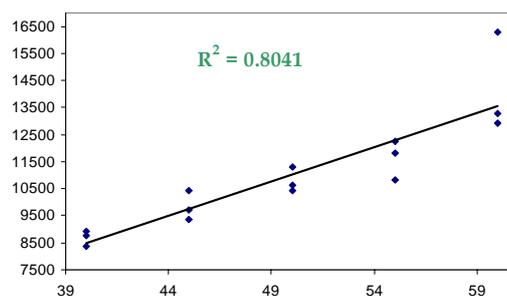
Sumbu Y adalah C_2 (J/K) dan sumbu X adalah set point ($^{\circ}$ C).

5. Perbandingan Metode Kotak Hitam dan Pembahasan Detail

Hal pertama yang akan dibandingkan adalah persebaran nilai C_1 untuk metode kotak hitam dan C_2 untuk metode pembahasan detail. Apabila dibuat trendline maka R^2 ke dua metode dapat dibandingkan.



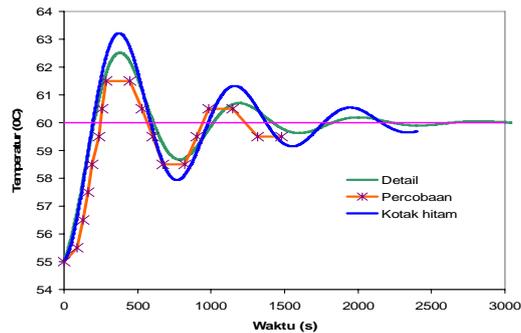
Gambar 13. R^2 metode kotak hitam



Gambar 14. R^2 metode pembahasan detail

Sumbu Y pada gb. 13 adalah C_1 (J/K), pada gb. 13 adalah C_2 (J/K) dan sumbu X adalah set point ($^{\circ}\text{C}$). Kapasitas kalor nilainya hanya tergantung temperatur, dan tidak dipengaruhi variasi laju udara. Dari kedua grafik diatas terlihat bahwa metode pembahasan detail memiliki nilai R^2 yang lebih besar dari metode kotak hitam terhadap kapasitas kalor sistem.

Hal kedua yang akan dibandingkan adalah error grafik literatur setiap metode dengan grafik percobaan. Untuk metode pembahasan detail error yang diperoleh lebih kecil untuk setiap percobaan jika dibandingkan dengan metode kotak hitam. Hal ini terlihat pada grafik salah satu data dibawah ini :



Gambar 15. Perbandingan error ke dua metode

Dari gambar diatas terlihat grafik respon metode detail (hijau) memiliki error yang lebih kecil dari pada grafik metode kotak hitam (biru). Jadi metode yang melibatkan unsur hambatan termal konveksi elemen pemanas dan heat loss lebih mendekati kondisi riil.

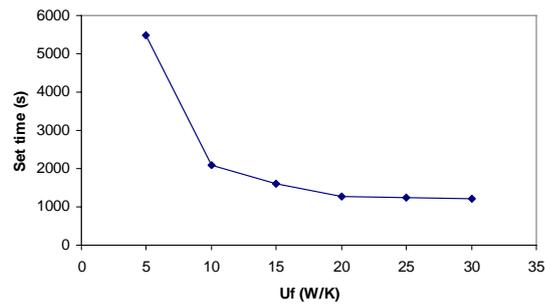
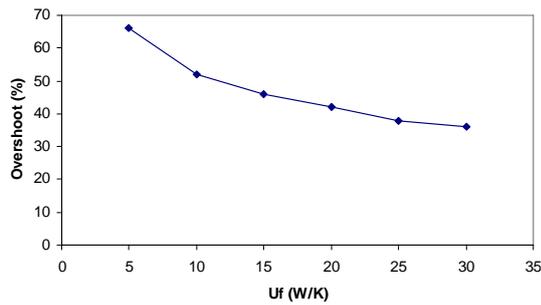
6. Simulasi Pengaruh Fin Pada Respon

Peningkatan faktor termal konveksi elemen pemanas (U_f) dapat dilakukan dengan cara menambahkan fin pada permukaan luar elemen pemanas. Hal ini akan memperluas bidang kontak dan mempercepat perpindahan panas. Dengan menggunakan satu contoh percobaan dengan data-data metode pembahasan detail sebagai berikut :

- ✘ Set point = 60°C
- ✘ C_1 = 540.5 J/K
- ✘ C_2 = 12420 J/K
- ✘ Laju udara = $30,7 \text{ g/s}$
- ✘ U_i = 55 W/K
- ✘ K_p = 20
- ✘ T_i = 20 s
- ✘ T_d = 5 s

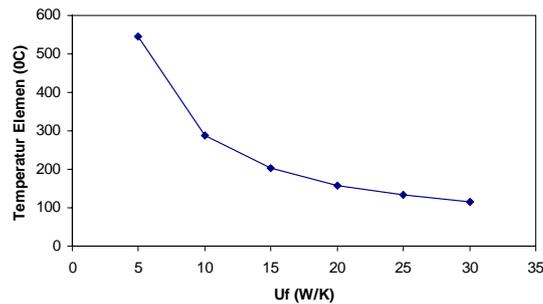
Tabel I. Pengaruh U_f terhadap Overshoot, set time respon dan temperatur elemen

U_f (W/K)	Overshoot (%)	Set time (s)	Temperatur elemen ($^{\circ}\text{C}$)
1	tidak stabil	-	-
5	66	5498	545.3
10	52	2080	287.7
15	46	1618	201.7
20	42	1262	158.8
25	38	1236	133.1
30	36	1217	115.9



Gambar 16. Pengaruh U_f terhadap Overshoot

Gambar 17. Pengaruh U_f terhadap waktu stabil



Gambar 18. Pengaruh U_f terhadap temperatur elemen pemanas

Dari grafik-grafik diatas terlihat bahwa faktor termal konveksi elemen pemanas (U_f) sangat mempengaruhi respon sistem dan kehandalam sistem. Untuk nilai U_f dibawa 1, respon sistem tidak akan stabil. Penambahan fin pada elemen pemanas dapat meningkatkan faktor konveksi elemen pemanas dan mempercepat respon, menurunkan overshoot respon dan menurunkan temperatur elemen pemanas.

7. Simulasi Pengaruh Nilai K_p Pada Respon

Pada bagian ini akan dibahas sejauh mana pengaruh nilai K_p mempengaruhi respon, dengan nilai T_i dan T_d tetap. Dengan menggunakan data-data metode pembahasan detail sebagai berikut :

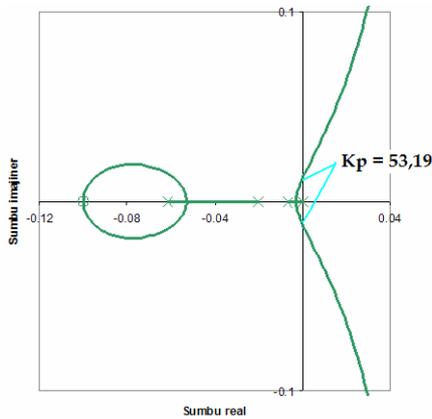
- ▣ Set point = 60 °C
- ▣ C_1 = 540.5 J/K
- ▣ C_2 = 12420 J/K
- ▣ Laju udara = 30,7 g/s
- ▣ U_f = 10,28 W/K
- ▣ U_i = 55 W/K
- ▣ T_i = 20 s
- ▣ T_d = 5 s

Tabel II. Pengaruh K_p terhadap Overshoot dan set time respon

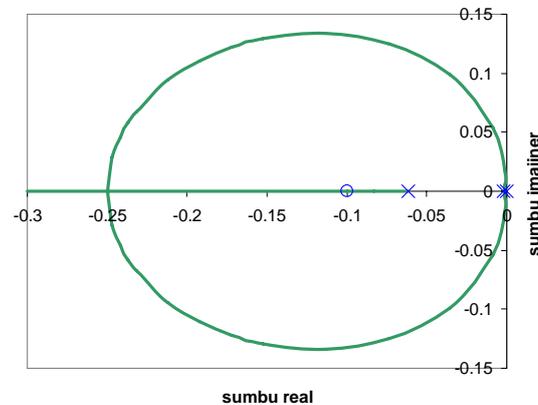
K_p	Overshoot (%)	Set time (s)
10	28	1329
20	52	1734
30	68	3353
40	80	>4000
50	90	>4000
60	unstabil	unstabil

Tabel diatas menunjukkan untuk nilai K_p sebesar 60 maka respon sistem tidak akan stabil atau steady. Hal ini menjelaskan bahwa penting untuk mengetahui karakteristik sistem sebelum menentukan sistem kontrol yang akan digunakan.

Untuk mengetahui batas nilai K_p sehingga respon akan steady, dapat digunakan metode root locus dari persamaan karakteristiknya dengan variabel K_p . Untuk data-data ini root locusnya adalah sebagai berikut :



Gambar 19. Root locus pembahasan detail



Gambar 20. Root locus metode kotak hitam

Dari gb19 menunjukkan bahwa pemilihan nilai K_p lebih besar dari 53,19 akan menyebabkan respon tidak stabil. Respon diatas dihitung dengan metode pembahasan detail. Selanjutnya nilai K_p akan divariasikan namun responnya dihitung dengan kotak hitam. Untuk mengetahui batas nilai K_p sehingga respon akan steady, digunakan metode root locus dari persamaan karakteristiknya dengan variabel K_p . Untuk data-data ini root locusnya adalah seperti gambar dibawah ini. Sedangkan dari gb.20 menunjukkan bahwa setiap nilai K_p , respon akan steady. Sehingga apabila respon suatu sistem kontrol pemanas udara dihitung dengan metode kotak hitam, hal ini akan memberikan informasi yang salah, karena untuk setiap nilai K_p respon akan steady. Namun kenyataannya respon sistem kontrol pemanas udara tidak akan steady untuk nilai K_p lebih besar dari 53,19. Hal ini menunjukkan sangat penting mengikutsertakan variabel hambatan termal konveksi elemen pemanas dan heat loss dalam menentukan karakteristik respon suatu sistem kontrol pemanas udara.

8. Kesimpulan

Dari percobaan dan pengolahan data yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan :

1. Fin sebagai media memperkecil hambatan termal konveksi elemen pemanas, mempengaruhi kestabilan dan respon sistem kontrol. Begitu juga dengan ketebalan isolator.
2. perancangan sistem kontrol pemanas udara harus melibatkan variabel hambatan termal elemen pemanas dan kerugian panas dari ruang pemanas.

Daftar Pustaka

- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, *ASHRAE*, 1981, *Handbook of Fundamentals*, ASHRAE, New York.
- Holman, J.P., 1995, *Perpindahan Kalor*, Erlangga, Jakarta.
- Incropera, Frank P., Dewitt David P., 2002, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*,: John Wiley & Sons, Singapore.
- Ogata, Katsuhiko, 1997, *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1 & 2*, Erlangga, Jakarta.
- Philips, C.L., Harbor, R.D., 1998, *Sistem Kontrol : Dasar-Dasar (Feedback Control System)*,: Prenhalindo, Jakarta.
- Zhukauskas, A., 1972, "*Heat Transfer from Tube in Cross Flow*," in J.P. Hartnett and T.F. Irvine, Jr., Eds., *Advances in Heat Transfer*, Vol.8, Academic Press, New York.