

PERANCANGAN, PEMBUATAN DAN PENGUJIAN SISTEM KENDALI TANGKI GANDA UNTUK ALAT PERAGA KULIAH SISTEM KENDALI

Zainal Abidin, Is Maryanto, Priyono Sutikno
Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITB, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132.

Ringkasan

Makalah ini membahas tentang motivasi dan konsep perancangan dalam pembuatan sistem kendali tangki ganda yang akan digunakan sebagai alat peraga dalam kuliah Pengantar Sistem Kendali. Disamping itu, dalam makalah ini juga dikemukakan tentang pengujian unjuk kerja alat tersebut ketika melacak beberapa macam sinyal perintah. Adapun strategi kendali yang diterapkan pada sistem ini adalah kendali On-Off, kendali Proporsional dan kendali Proporsional-Integral. Pengaruh interaksi antar kanal juga diperagakan dalam makalah ini. Selain merupakan contoh cara perancangan sistem, makalah ini diharapkan bermanfaat untuk dosen mesin yang mengajar kuliah Pengantar Sistem Kendali, terutama pengajar di universitas swasta.

Abstract

This paper describes the motivation and design criteria for the development of a couple-tank control system which is intended to be used as a demonstration apparatus for a lecture course on Introduction to Control Systems. The work also demonstrates the performances of the controlled system in tracking various types of command inputs. Control strategies implemented to the system are On-Off control, Proportional control and Proportional-Integral control. Influences of dynamic interaction between channels on the performance degradation are also shown in this work. Except as a control system design example, this work is expected to be useful to mechanical engineering lecturers giving courses on Introduction to Control Systems, particularly to those in private universities.

Keywords: Sistem kendali, kendali On-Off, Proporsional, Proporsional-Integral, Konsep Perancangan.

1. Pendahuluan

Sudah sejak tahun 60an mata kuliah Pengantar Sistem Kendali (Teknik Mengatur) diberikan di Jurusan Mesin ITB. Namun, sampai saat ini kuliah tersebut belum memiliki alat peraga yang dapat dipakai untuk membantu mahasiswa dalam memahami materi yang dibahas di dalamnya. Padahal bagi kebanyakan mahasiswa, mesin mata kuliah ini merupakan bidang yang sulit dipelajari. Hal ini dapat dimengerti mengingat istilah-istilah seperti sinyal, penguatan (*gain*), jerat (*loop*), umpan balik (*feedback*), sensor, pengatur (*regulator*) dan pengendali (*controller*) bukanlah merupakan istilah yang lazim mereka kenal sehari-hari. Lain halnya dengan mahasiswa elektro maupun teknik fisika yang mengenal istilah-istilah tersebut dengan baik sejak mereka duduk di tingkat dua. Karena itu, tidak mengherankan bila sebagian alumni mesin yang telah lama bekerja di industri menyatakan 'Apa guna belajar Teknik Mengatur?' atau 'Dimana Teknik Mengatur itu dipakai?'. Kondisi ini bertambah ruyam karena matematik yang digunakan dalam kuliah tersebut cukup banyak. Bila pengajar tidak berhati-hati, besar kemungkinan mahasiswa peserta kuliah tersebut masuk ke 'hutan matematik' dan tidak mengerti apa arti fisik dan tujuan dari analisis yang dipelajarinya.

Kemajuan teknologi yang begitu pesat telah memaksa mahasiswa dan alumni mesin untuk mau-tidak-mau harus mengerti dan menggunakan teknik kendali. Hampir semua produk mesin saat ini telah di 'make-up' dengan elektronika dan kontrol sehingga menjadi suatu produk yang 'pintar'. Lihat saja bagaimana perkembangan teknologi kamera (*Advance Photo System, Red-eye Reduction, Multiple Exposures, Multi-point Sensors*), mesin cuci (*Neuro Fuzzy Control*), otomotif (*Anti Brake-locking System, Traction Control, Adaptive Suspension, Engine Control, Power Steering, Drowsiness Detection System*), Mesin Fotokopi, bahkan sampai timbangan digital (*Automatic Zeroing, Nonlinearity Compensation*). Semua fakta tersebut menuntut agar lulusan mesin tidak canggung terhadap pemakaian elektronika dan kendali.

Salah satu cara untuk membuat materi kuliah Pengantar Sistem Kendali mudah dipahami adalah dengan menggunakan alat peraga. Alat peraga ini diharapkan dapat mempermudah konsep-konsep yang diajarkan dalam kuliah Pengantar Sistem Kendali. Pemikiran ini didasarkan pada faham bahwa 'untuk mengerti konsep adalah sulit, tetapi untuk mengerti fakta adalah mudah'. Dalam uraian berikut ini akan dibahas tentang proses perancangan, pembuatan dan pengujian alat peraga yang diinginkan.

2. Konsep Perancangan Alat Peraga

Merancang merupakan langkah pemecahan terhadap suatu masalah atau memecahkan masalah yang sudah dipecahkan dengan cara lain [1]. Jadi, dalam merancang tidaklah semua komponennya harus baru, tetapi dapat saja menggunakan komponen yang sudah ada.

Dalam perancangan suatu sistem, syarat yang ingin dipenuhi dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu syarat wajib (must) dan syarat yang sebaiknya dipenuhi (should) [2].

Adapun syarat yang wajib dipenuhi oleh sebuah alat peraga untuk kuliah Pengantar Sistem Kendali adalah:

- Alat peraga harus dapat menunjukkan secara visual fenomena-fenomena yang umum terjadi pada suatu sistem kendali seperti osilasi, *overshoot*, saturasi dsb.
- Alat peraga harus bisa memperagakan unjuk kerja beberapa strategi pengendalian seperti kendali jerat terbuka, kendali jerat tertutup, kendali *On-off*, kendali PI (Proporsional Integral) dan kendali PID (Proporsional Integral Derivatif). Kendali *On-Off* dan PID merupakan kendali yang paling banyak dipakai di industri.
- Alat peraga harus mampu menunjukkan cara kerja komponen-komponen utama penyusun suatu sistem kendali seperti sensor, aktuator, pengatur dan penguat (*amplifier*).
- Alat kendali harus dapat menunjukkan perilaku sistem masukan-tunggal-keluaran-tunggal (*Single-Input-Single-Output, SISO*) dan sistem masukan-jamak-keluaran-jamak (*Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO*).
- Alat peraga harus dapat dikendalikan secara on-line dengan satu buah komputer PC agar semua hasil yang diperoleh dapat digambar pada layar monitor.

Sementara itu, syarat yang diharapkan dapat dipenuhi oleh alat peraga tersebut adalah:

- Alat peraga diharapkan sederhana agar mudah dipahami, cukup kecil agar mudah dibawa dan disimpan, murah dan mudah dioperasikan.
- Respon dari alat peraga diharapkan cukup lambat agar perilaku yang terjadi dapat diamati secara seksama dengan mata (tanpa bantuan alat perekam).

Untuk mendapatkan solusi yang baik, mula-mula perlu dikumpulkan beberapa alternatif alat peraga yang mungkin dibuat. Beberapa alternatif alat peraga yang mungkin dibuat antara lain adalah sistem mekanik (robot planar dua sumbu, pendulum), sistem termal (pemanas udara, *engine control*), sistem elektrik (kendali motor DC) dan sistem fluida (aktuator hidrolik, sistem tangki ganda). Perbandingan antara alternatif-alternatif tersebut diulas dalam Tabel 1. Tabel ini berisi penilaian tentang kemudahan/kesulitan alat tersebut dalam memenuhi syarat perancangan. Misalkan saja, pemanas udara diberi nilai 0 dalam kolom visual karena variabel yang dikendalikan (yaitu temperatur) sulit untuk dilihat secara visual. Sebaliknya, aktuator hidrolik diberi nilai 100 karena posisinya tampak secara jelas. Walaupun telah diusahakan secara objektif, namun karena keterbatasan pengetahuan perancang, penilaian ini mungkin masih bersifat subjektif. Dalam tabel ini terlihat bahwa, menurut penilaian perancang, sistem kendali tangki ganda merupakan alternatif alat peraga yang terbaik.

Sebenarnya, menurut metode Pahl dan Beitz [2] penentuan alternatif terbaik harus didasarkan pada tabel evaluasi yang berisi tentang penilaian dan bobot untuk masing-masing faktor. Nilai total kemudian dihitung dari penjumlahan hasil perkalian antara nilai dengan bobotnya. Namun, dalam penelitian ini penilaian total semacam itu tidak diperlukan karena pilihan terbaik sudah tampak dalam Tabel 1.

Tabel 1 Perbandingan beberapa alternatif alat peraga sistem kendali (100=mudah dilakukan. 0=sulit)

No.	Jenis alat peraga	Harus (must)					Sebaiknya (should)	
		Visual	<i>On-off</i> , PID	Cara kerja	MIMO	1 PC	Sederhana	Lambat
1.	Robot planar 2 sumbu	50	50	60	100	20	80	30
2.	Pemanas udara	0	100	40	0	100	70	70
3.	Pendulum (normal / balik)	90	10	100	0	20	90	10
4.	Tangki air ganda	100	100	100	100	100	50	100
5.	<i>Engine control</i>	0	50	50	20	80	10	10
6.	Aktuator hidrolik, posisi	100	50	70	25	65	0	80
7.	Motor DC kecil, kecepatan	30	100	100	0	100	100	50

3. Perancangan dan Pembuatan Sistem dan Komponen-komponennya

Konstruksi keseluruhan dari sistem kendali tangki ganda disajikan pada Gambar 1 [5]. Dalam gambar ini terlihat bahwa sistem tangki ganda tersusun dari beberapa komponen mekanik, elektronik dan perangkat lunak. Sesuai dengan nomor yang digunakan dalam Gambar 1, komponen-komponen tersebut adalah:

1. Bak air penampung.
2. Tangki ganda yang memiliki dua katup keluaran dan sebuah katup penghubung antar tangki.
3. Pompa (aktuator).
4. Selang air sebagai penghubung pompa dengan tangki.
5. Sensor ketinggian permukaan air.
6. Rangkaian pengatur tegangan motor pompa.
7. Kartu DAS16 yang memiliki konverter analog ke digital (ADC) dan konverter digital ke analog (DAC).
8. Komputer PC.
9. Perangkat lunak pengendalian.

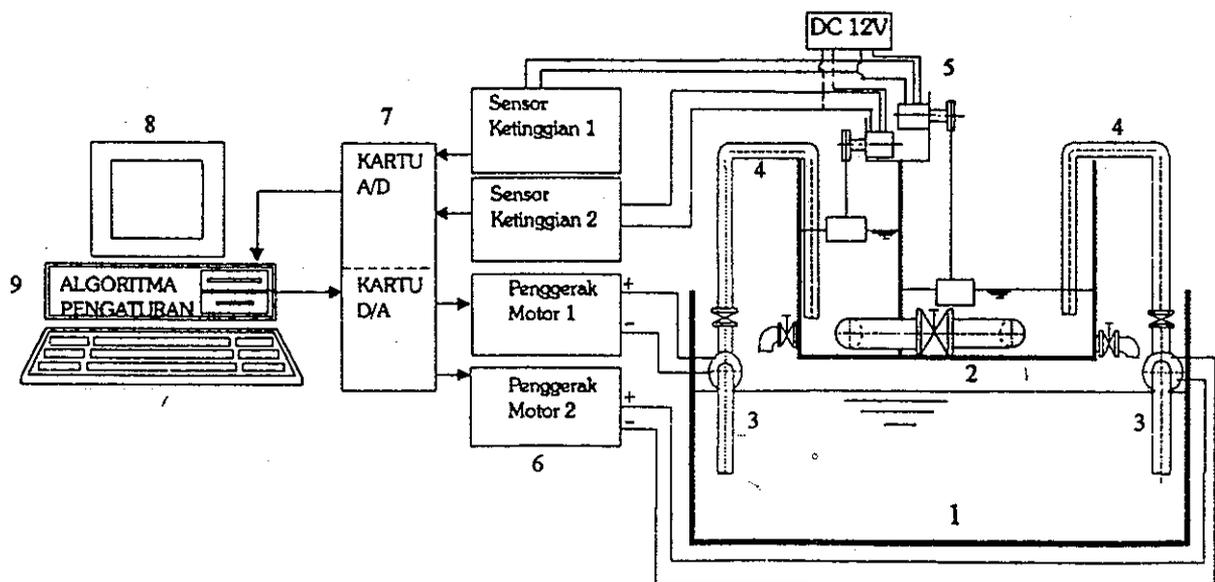
Bak penampung dan tangki ganda yang dibuat dirancang dengan dimensi seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Tangki ini dibuat dari bahan *PVC (Poly Vinyl Chloride)* yang berwarna bening sehingga mudah diamati dari luar. Adapun bahan bak penampung adalah *flexiglass* yang berwarna bening dan harganya murah. Perhitungan kekuatan tangki tidak dilakukan dalam kegiatan ini dengan alasan berikut:

1. Berdasarkan intuisi, beban yang terjadi kecil.
2. Pengetahuan penulis tentang kekuatan dan sifat-sifat bahan *PVC* dan *flexiglass* sangat terbatas.
3. Penelitian ini bukan ditujukan untuk 'Perhitungan kekuatan tangki ganda yang terbuat dari bahan *PVC*'.

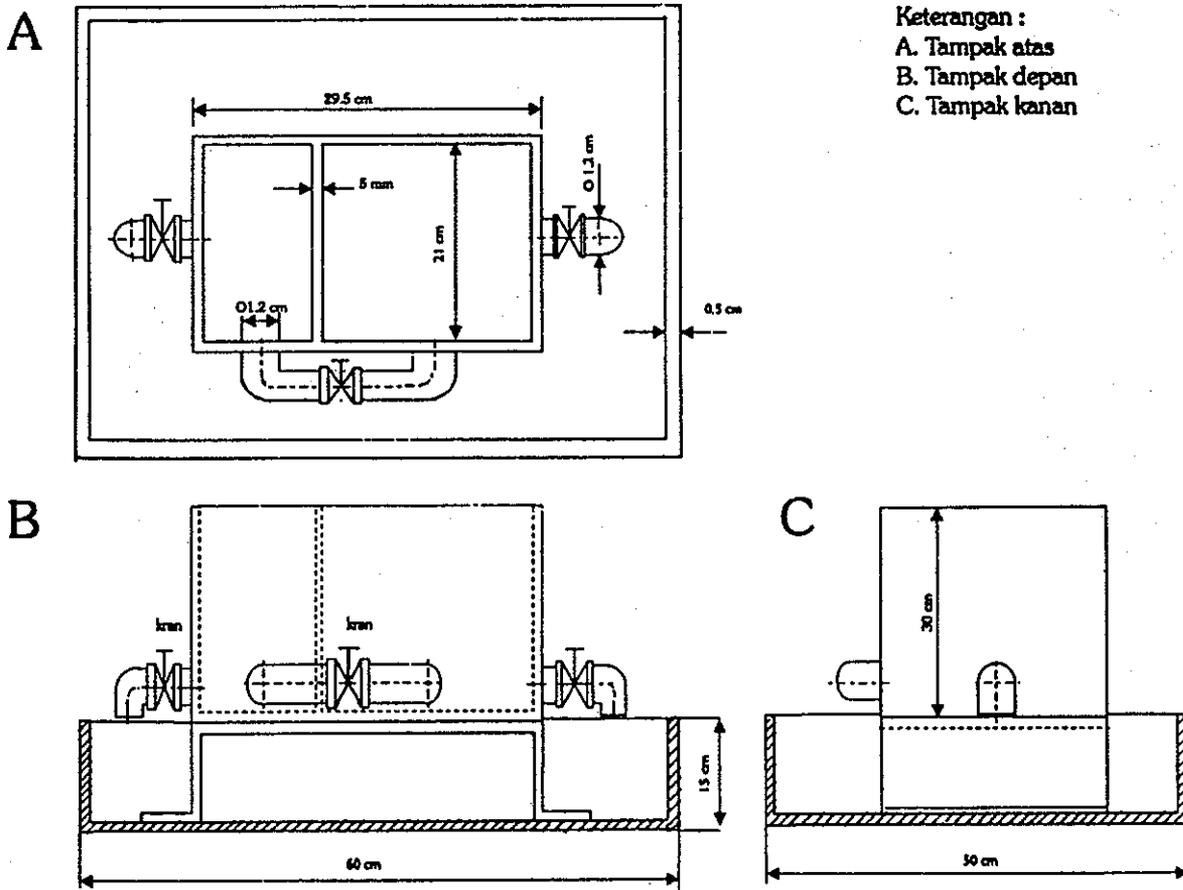
Adapun dasar perancangan dimensi sistem tangki ganda adalah besarnya kapasitas pompa yang tersedia di pasaran. Pompa yang dipilih adalah pompa aquarium jenis *submerged sentrifugal* dengan catu daya motor sebesar 35 Watt dan tegangan listrik DC 12 Volt. Pemilihan pompa dengan motor DC dikarenakan motor jenis ini mudah diatur kecepatannya, aman dan tidak banyak menimbulkan derau (*noise*) dalam proses pengendaliannya. Motor yang dipakai mempunyai kapasitas sebesar 1512 liter per jam atau 420 cm³ per detik pada tegangan 12 Volt. Jadi, untuk dimensi tangki seperti dalam Gambar 2 maka tangki kecil (kiri) akan penuh dalam waktu 11,5 detik sedangkan tangki besar dalam waktu 28,6 detik. Selang waktu tersebut dinilai cukup memungkinkan mahasiswa untuk dapat mengamati secara visual percobaan yang sedang berlangsung.

Sensor ketinggian digunakan untuk mengubah besaran ketinggian air menjadi tegangan listrik. Besaran ini diperlukan sebagai sinyal umpan balik dalam pengendalian sistem tangki ganda. Ada beberapa alternatif sensor ketinggian yang dapat digunakan untuk keperluan ini, diantaranya adalah potensiometer, *LVDT*, sensor kapasitif maupun sensor ultrasonik [3]. Dalam penelitian ini dipilih potensiometer sebagai sensor ketinggian permukaan air karena cara kerjanya mudah dimengerti dan dapat diamati secara visual. Selain itu, sensor ini sederhana, murah dan mudah dioperasikan. Gambar 3 berikut memperlihatkan konstruksi dari sensor ketinggian permukaan air.

Sensor ini bekerja berdasarkan gerak naik-turun pelampung. Gerakan ini akan diteruskan oleh benang nylon ke sebuah puli yang dipasang pada poros potensiometer. Putaran puli ini akan mengakibatkan perubahan hambatan potensiometer. Dengan memberikan tegangan listrik yang tetap sebesar 12 Volt pada ujung-ujung potensiometer, maka perubahan

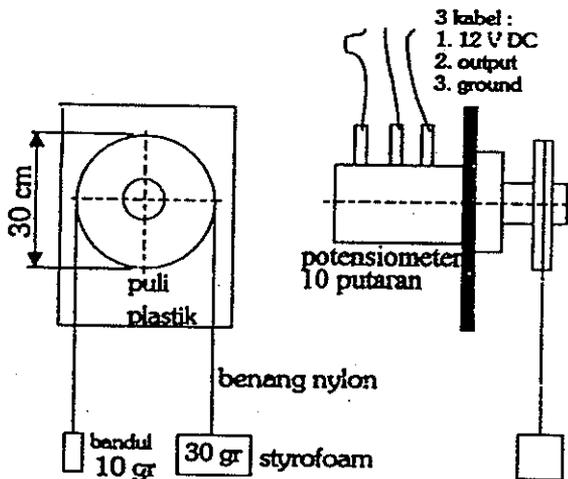


Gambar 1. Konstruksi Keseluruhan dari Sistem Kendali Tangki Ganda



Keterangan :
 A. Tampak atas
 B. Tampak depan
 C. Tampak kanan

Gambar 2. Bentuk dan Ukuran Tangki Ganda dan Bak Penampung



Gambar 3. Konstruksi sensor ketinggian permukaan air.

tinggi air akan menyebabkan perubahan tegangan keluaran pada potensiometer. Jenis potensiometer yang dipakai adalah potensiometer 10 putaran (*ten-turn rotary potentiometer*) dengan hambatan 5 K Ω .

Pada rancangan sensor ketinggian ini, diameter puli yang digunakan akan menentukan ketelitian pembacaan ketinggi-

an air. Pemilihan diameter puli yang kecil akan menyebabkan putaran potensiometer yang terjadi menjadi banyak sehingga pembacaan ketinggian air menjadi teliti. Di sisi lain, diameter puli yang kecil juga menyebabkan gerak puli tersendat-sendat akibat besarnya gaya angkat permukaan yang diperlukan untuk mengatasi torsi gesekan yang terjadi pada potensiometer. Karena besar gesekan ini hanya dapat diketahui dari pengujian, maka diameter puli, berat bandul, berat pelampung dan dimensi pelampung ditentukan dengan cara eksperimental. Pelampung yang digunakan dibuat dari bahan *styrofoam* yang diisi dengan timah. Dimensi penampung dari pelampung juga akan menentukan besar gaya angkat yang terjadi per satuan tinggi permukaan air sehingga menentukan kepekaan sensor.

Selain komponen di atas, dalam sistem kendali tangki ganda juga digunakan perangkat keras dan perangkat lunak sebagai alat pengukuran, pengolahan data dan pengendalian. Perangkat keras yang digunakan terdiri dari satu unit komputer PC, satu, buah kartu interface DAS20 dengan fasilitas ADC dan DAC, serta rangkaian penggerak motor pompa.

Konverter analog to digital (ADC) digunakan untuk mengubah sinyal analog menjadi besaran digital sehingga dapat dibaca oleh komputer. Besaran analog yang masuk ke

konverter ini adalah tegangan keluaran yang dihasilkan oleh sensor ketinggian. Setelah diterjemahkan oleh komputer, sinyal ini kemudian dibandingkan dengan harga ketinggian yang diinginkan. Kesalahan yang terjadi selanjutnya digunakan sebagai masukan oleh algoritma kendali. Berdasarkan sinyal kesalahan ini, algoritma kendali akan menentukan besar aksi kendali yang diperlukan. Harga ini kemudian dikirim ke konverter digital ke analog (DAC) untuk diubah menjadi sinyal tegangan listrik yang kontinu. Untuk menggerakkan motor, sinyal ini perlu diperkuat dahulu dengan rangkaian penggerak motor pompa.

Dalam Gambar 4 ditampilkan skema dari rangkaian penggerak motor pompa. Rangkaian ini dibuat dengan komponen utama yang berupa IC LM 723 yang berfungsi untuk mengatur tegangan (*voltage regulator*). Karena arus keluaran dari IC ini kecil (150 mA), maka arus ini perlu dikuatkan dahulu dengan transistor-transistor penguat daya agar mampu menggerakkan motor pompa yang membutuhkan arus listrik sebesar 3,5 A.

Perangkat lunak akuisisi data, pengolahan, pengendalian dan tampilan ditulis dalam bahasa pemrograman Turbo Pascal 5.5. Bentuk tampilan (grafik) dibuat on-line sehingga mudah dihayati oleh mahasiswa peserta praktikum. Dengan cara ini mahasiswa dapat menghayati arti fisik dari grafik yang ditampilkan di layar monitor.

4. Pengujian Sistem Keseluruhan

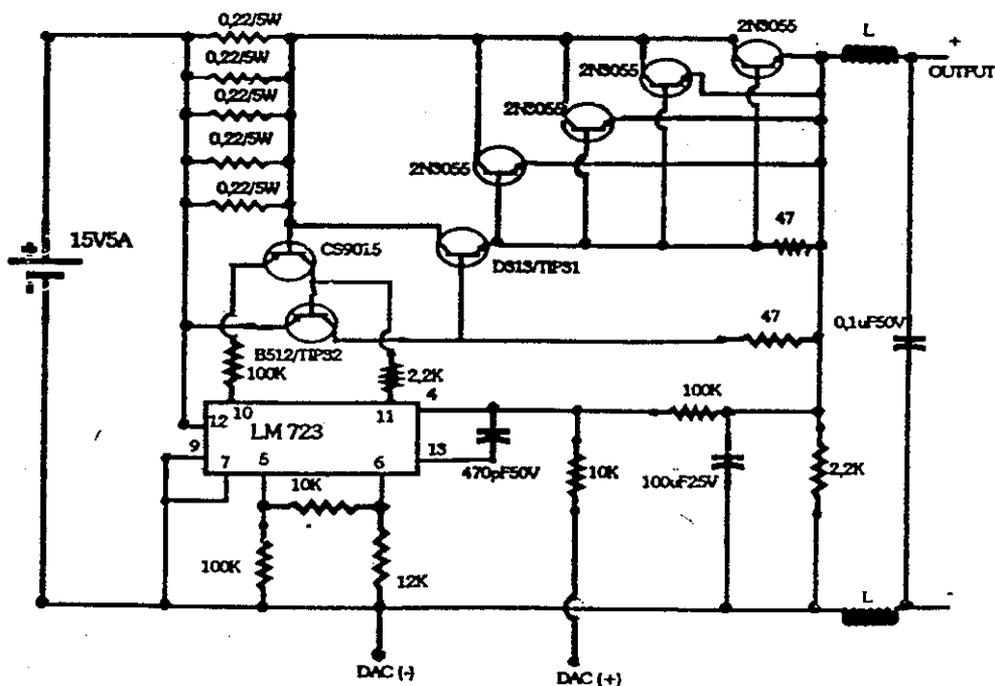
Setelah semua komponen dari sistem kendali tangki ganda selesai dibuat, maka langkah selanjutnya adalah pengujian komponen. Pada pengujian ini tidak ditemukan masalah yang berarti, karena itu komponen yang dibuat dapat

dirakit menjadi sistem keseluruhan. Sistem keseluruhan ini kemudian diuji secara fungsional. Pada pengujian sistem keseluruhan ditemukan satu masalah serius yaitu terjadi aliran balik dari tangki ke bak penampung pada saat motor pompa dihentikan. Untuk mengatasi hal ini, pada sisi keluaran pompa dipasang katup satu arah. Karena katup satu arah yang kecil dan bertekanan rendah sulit ditemukan di pasaran, maka katup ini dibuat sendiri dari karet. Katup yang dibuat ternyata dapat berfungsi dengan baik, karena itu sistem kendali tangki ganda siap dioperasikan.

4.1 Penerapan beberapa strategi kendali

Dalam pengujian ini beberapa macam strategi kendali dicoba diterapkan pada sistem tangki ganda. Strategi kendali yang digunakan meliputi kendali *On-off* tanpa toleransi, kendali *On-off* dengan toleransi, kendali proporsional (P), kendali proporsional-integral (PI), dan kendali proporsional-integral-derivatif (PID). Karena keterbatasan tempat, dalam makalah ini hanya akan dibahas tentang unjuk-kerja sistem tangki ganda dibawah kendali *On-off* dengan toleransi, kendali P dan kendali PI.

Pada Gambar 5 ditampilkan tinggi permukaan air dari tangki besar dan tangki kecil ketika sistem diminta untuk mengikuti perintah sigmun. Pada kondisi ini saluran penghubung antar tangki ditutup sehingga tangki ganda bertindak sebagai dua buah sistem *SISO*. Adapun strategi kendali yang digunakan adalah kendali *On-off* dengan toleransi sebesar 1 cm. Ini berarti bahwa pompa boleh beristirahat apabila kesalahan antara ketinggian air yang diinginkan dan yang terjadi tidak melebihi 1 cm. Dalam gambar tersebut juga tampak besar tegangan listrik yang dikirimkan ke pompa. Dalam kontrol *On-off*, tegangan yang dikirimkan ke pompa hanya dapat berharga 0 atau 12 Volt.



Gambar 4. Skema Rangkaian Penggerak Motor Pompa

Selanjutnya, pada Gambar 6 ditampilkan unjuk kerja sistem tangki ganda dengan strategi kendali P. Seperti telah menjadi rahasia umum, aksi kendali P akan menghasilkan kesalahan stedi. Jadi pada kondisi stedi ketinggian air yang terjadi tidak akan sama besar dengan ketinggian air yang diinginkan.

Pada Gambar 7 disajikan unjuk kerja sistem tangki ganda dengan strategi kendali PI. Tampak dalam gambar ini bahwa strategi kendali PI dapat menghilangkan kesalahan stedi. Pada gambar ini juga tampak jelas bahwa prestasi kendali ini dalam mengikuti perintah kenaikan ketinggian permukaan air lebih baik dari prestasinya sewaktu mengikuti perintah penurunan ketinggian air. Hal ini karena kendali ketinggian permukaan air merupakan kendali satu arah [4].

4.2 Lacakan terhadap beberapa macam perintah

Selain mengikuti perintah signum, tangki ganda juga dapat diminta untuk mengikuti perintah step, segitiga dan sinus. Gambar 8 dan 9 memperlihatkan unjuk kerja sistem tangki ganda dalam mengikuti perintah sinus. Gambar 8 adalah hasil pengujian dengan kendali *On-off* dengan toleransi sedangkan gambar 9 untuk kendali proporsional. Unjuk kerja yang sama untuk kendali PI dan PID tidak ditampilkan karena gambar sinyal perintah berimpit dengan ketinggian yang terjadi. Untuk menggambarkan kondisi ini diperlukan tampilan atau cetak berwarna.

4.3 Sistem MIMO

Sistem tangki ganda dapat bertindak sebagai sebuah sistem *MIMO* dengan dua buah masukan dan dua buah keluaran. Untuk memperagakan kondisi ini maka katup penghubung antar tangki dibuka. Semakin besar bukaan katup antar tangki akan menyebabkan semakin kuatnya interaksi antar kanal yang terjadi. Gambar 10 memperlihatkan interaksi antar kanal yang terjadi ketika katup penghubung tangki

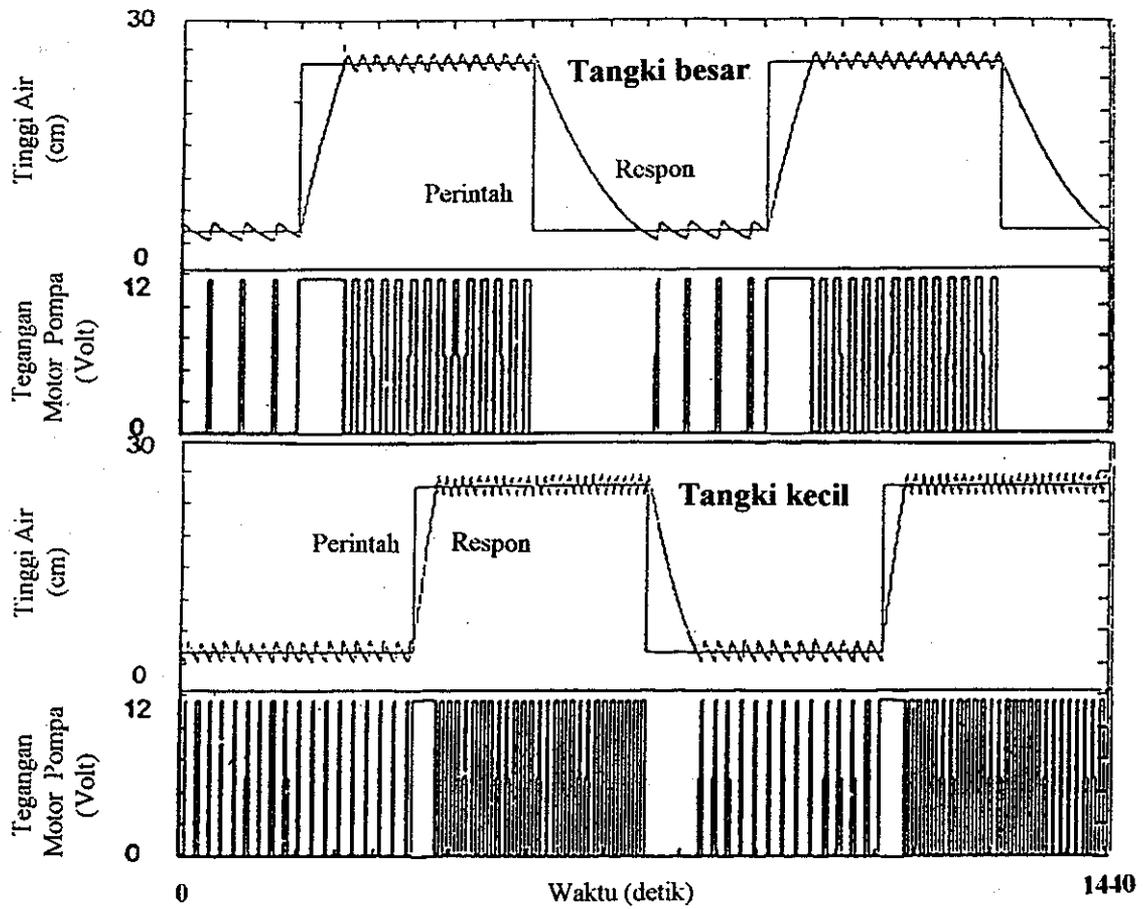
dibuka 50%. Ketika tangki besar mencoba mengikuti sinyal perintah untuk naik maka pada tangki kecil akan timbul aliran antar tangki. Pada saat lain, ketika tangki besar hendak turun, tangki kecil akan mengalirkan air ke tangki besar. Untuk menanggulangi kondisi ini, diperlukan strategi kendali yang lebih canggih, misalnya dengan kendali Neuro [4].

5. Kesimpulan

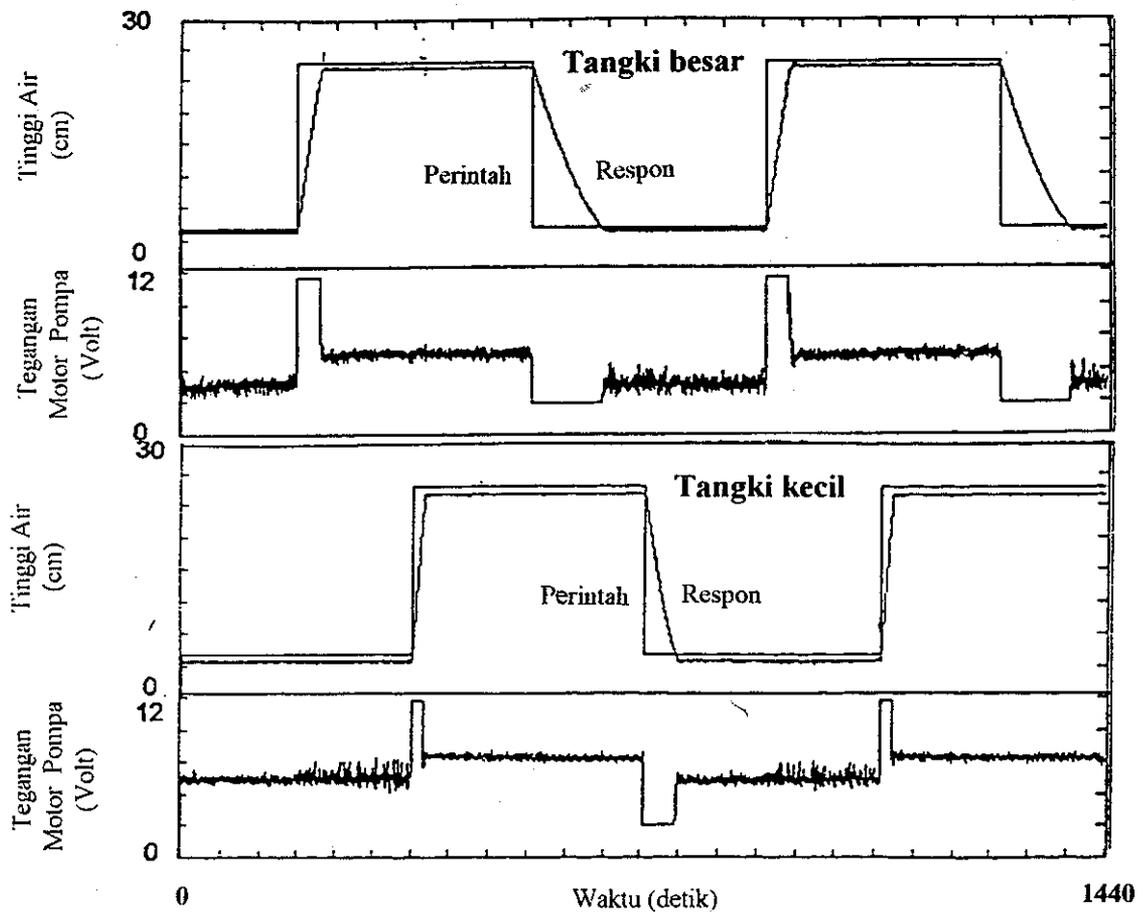
Dalam makalah ini telah dibahas tentang konsep perancangan, pembuatan dan pengujian sistem kendali tangki ganda yang akan dipakai sebagai alat peraga kuliah Pengantar Sistem Kendali. Sistem yang dibuat dapat bekerja dengan baik dan dapat memenuhi syarat-syarat perancangan yang diinginkan. Alat ini dirasa sangat tepat untuk membantu kuliah Pengantar Sistem Kendali karena murah, sederhana dan mudah dibuat.

6. Daftar Pustaka

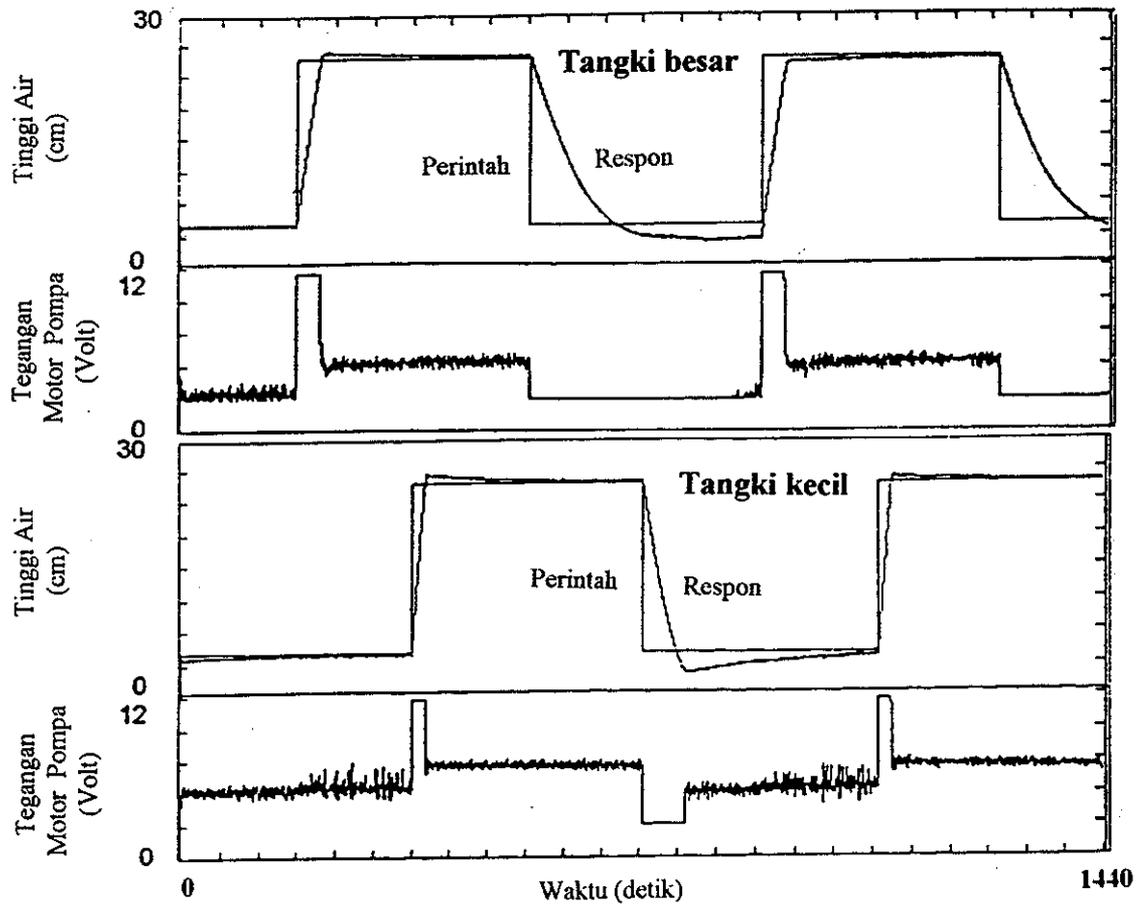
1. G. E. Dieter, *Engineering Design*, McGraw-Hill, New York, 1991.
2. G. Pahl dan W. Beitz, *Engineering Design: A Systematic Approach*, Springer Verlag, 1988.
3., *Cole-Palmer 1995-1996 General Catalog*, Cole-Palmer Instrument Company, Illinois, 1995.
4. Z. Abidin dan I. B. Santoso, *Implementation of Neural Network Controllers to a MIMO Unidirectional Nonlinear Plant*, ICARCV'96 Proceedings, Singapore, 1996.
5. Is Maryanto, *Pembuatan Sistem Kendali Tangki Ganda Sebagai Alat Peraga Kuliah Teknik Kendali*, Tugas Sarjana S1, Jurusan Teknik Mesin FTI-ITB, 1995.



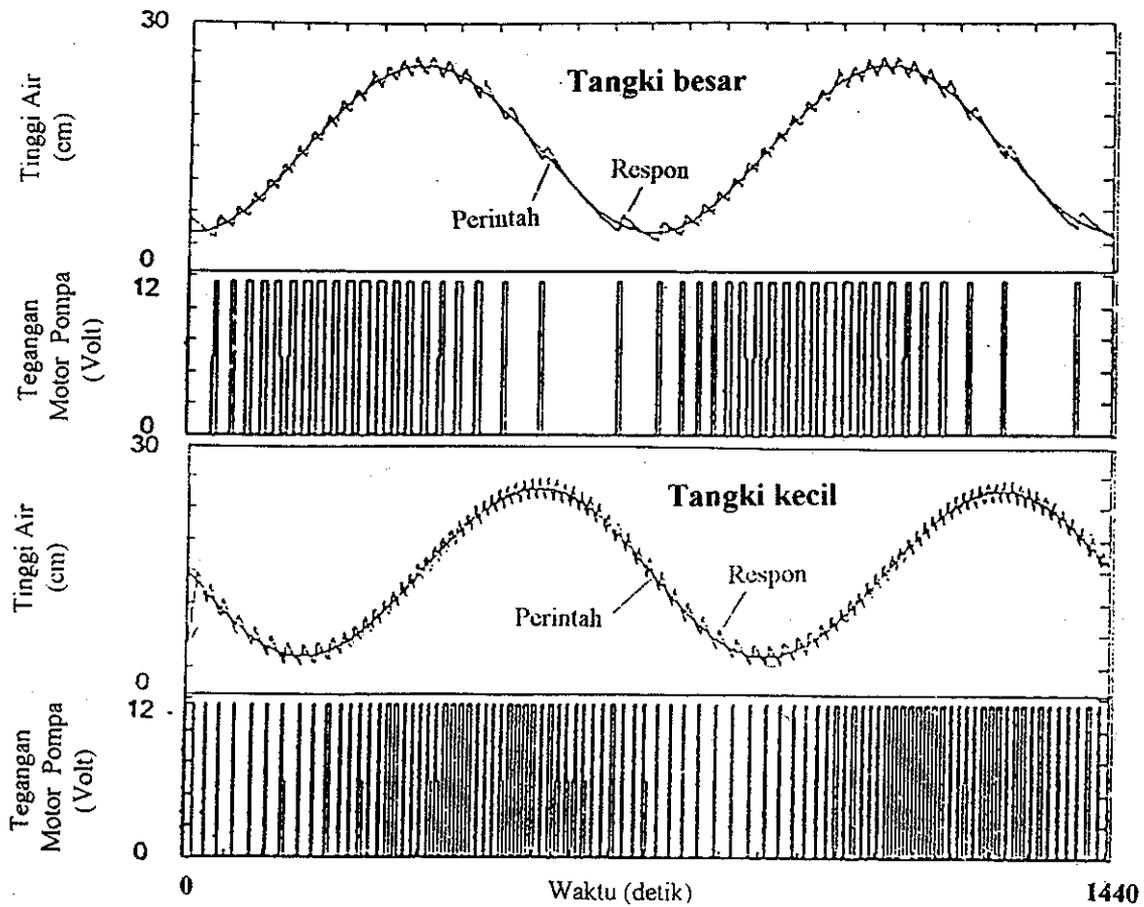
Gambar 5. Unjuk Kerja Sistem Tangki Ganda dengan Kendali *On-off* dan Perintah Signum.



Gambar 6. Unjuk Kerja Sistem Tangki Ganda dengan Kendali Proporsional dan Perintah Signum.



Gambar 7. Unjuk Kerja Sistem Tangki Ganda dengan Kendali PI dan Perintah Signum.



Gambar 8. Unjuk Kerja Sistem Tangki Ganda dengan Kendali On-off dan Perintah Sinus.