

OPTIMASI SISTEM PENGENDALI REAKTOR DAYA

Sarwo D. Danupoyo*



ID990000027

ABSTRACT

THE OPTIMIZATION OF POWER REACTOR CONTROL SYSTEM. A power reactor is an important part in nuclear powered electrical plant systems. Success in controlling the power reactor will establish safety of the whole power plant systems. Until now, the power reactor has been controlled by a classical control system that was designed based on output feedback method. To meet the safety requirements that are now more restricted, the recently used power reactor control system should be modified. This paper describes a power reactor control system that is designed based on a state feedback method optimized with LQG (linear-quadrature-gaussian) method and equipped with a state estimator. A pressurized-water type reactor has been used as the model. by using a point kinetics method with one group delayed neutrons. The result of simulation testing shows that the optimized control system can control the power reactor more effective and efficient than the classical control system.

ABSTRAK

OPTIMASI SISTEM PENGENDALI REAKTOR DAYA. Reaktor daya merupakan bagian terpenting dalam sistem pembangkit listrik bertenaga nuklir. Keberhasilan dalam mengendalikan reaktor daya akan menentukan keselamatan sistem pembangkit listrik secara keseluruhan. Sampai saat ini reaktor daya masih dikendalikan dengan sistem pengendali klasik yang dirancang berdasarkan metoda *output feedback*. Untuk memenuhi persyaratan keselamatan yang semakin ketat, sistem pengendali reaktor daya yang ada perlu ditingkatkan kemampuannya, sehingga dapat diperoleh unjuk kerja yang lebih baik. Makalah ini membahas sistem pengendali reaktor daya yang dirancang berdasarkan metoda *state feedback* yang dioptimasi dengan metoda LQG (*linear-quadrature-gaussian*) yang dilengkapi dengan *state estimator*. Sebagai model reaktor daya digunakan jenis reaktor air tekan. Model dibuat menggunakan teori kinetika titik dengan satu kelompok neutron kasip. Hasil pengujian secara simulasi menunjukkan sistem pengendali yang telah dioptimasi dapat mengendalikan reaktor daya secara lebih efektif dan efisien dibandingkan dengan sistem pengendali klasik.

PENDAHULUAN

Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan sebuah sistem pembangkit listrik yang terdiri atas beberapa subsistem seperti sistem pendingin primer, sistem air pengisian dan sistem turbin. Masing-masing subsistem memiliki sebuah atau lebih sistem pengendali (Gambar 1). Setiap sistem pengendali memiliki karakteristik kerja sendiri-sendiri. Meskipun demikian sistem-sistem pengendali tersebut harus bekerja secara sinkron, karena keluaran dari sebuah sistem pengendali subsistem tidak hanya

* Pusat Pengkajian Teknologi Nuklir - BATAN

berpengaruh pada subsistem yang dikendalikannya tetapi juga subsistem lain yang terkait. Kondisi ini menimbulkan kompleksitas dalam perancangan sistem pengendali PLTN dan menyebabkan usaha penggantian sistem pengendali PLTN dari sistem pengendali klasik yang memiliki kemampuan tanggap yang lambat ke sistem pengendali digital yang memiliki kemampuan tanggap yang cepat belum dapat terlaksana. Sebagai akibatnya, keselamatan dan kesuksesan operasi PLTN tetap bergantung sepenuhnya pada kemampuan operator.

Reaktor daya merupakan bagian terpenting dan terumit dalam PLTN. Hal ini disebabkan reaktor daya merupakan sebuah sistem tak linear yang memiliki beberapa besaran pengubah yang saling mempengaruhi seperti tekanan, suhu dan level air. Dengan demikian perancangan sistem pengendali reaktor daya juga merupakan bagian tersulit dalam merancang sistem pengendali PLTN, khususnya dalam penerapan metoda pengendalian digital pada PLTN [1][2].

Makalah ini akan membahas rancangan sistem pengendali reaktor daya yang telah dioptimasi. Sistem pengendali dirancang berdasarkan metoda umpan balik keadaan (*state feedback*), sedangkan optimasi dilakukan dengan metoda *linear-quadrature-gaussian* (LQG). Agar rancangan yang baru dapat dibandingkan dengan sistem pengendali klasik, maka sistem pengendali klasik yang menggunakan umpan balik keluaran (*output feedback*) tetap digunakan sebagai basis perancangan. Reaktor daya yang akan dikendalikan dimodelkan dengan metoda kinetika titik (*point kinetics method*) dengan satu kelompok neutron kasip (*one group delayed neutron*).

METODA PENGENDALIAN OPTIMAL[3]

Blok diagram sistem pengendali klasik yang saat ini umum digunakan dalam pengendalian PLTN untuk satu masukan satu keluaran (*single-input-single-output*) ditunjukkan pada Gambar 2. Nilai keluaran yang diinginkan P_v ditetapkan oleh operator. Selanjutnya sistem pengendali akan mengatur nilai masukan u berdasarkan besarnya *error* antara P_v dan y , sedemikian sehingga nilai keluaran y sesuai dengan nilai P_v . Unjuk kerja sistem pengendali ditentukan oleh gain G_c yang nilainya ditetapkan oleh perancang dengan cara *trial-and-error*.

Dalam perancangan dan analisa sistem pengendalian posisi gain G_c sering juga ditempatkan pada alur umpan balik seperti terlihat pada Gambar 3. Agar tidak terjadi perubahan nilai pengendalian pada masukan u , maka pada sisi P_v juga dimasukkan nilai sebesar G_c .

Sistem pengendali umpan balik keadaan dirancang menggunakan struktur yang mirip dengan sistem pengendali klasik pada Gambar 3. Bedanya sinyal umpan balik tidak diambil dari sinyal keluaran tetapi dari besaran operasional yang menentukan keadaan reaktor (selanjutnya disebut sinyal keadaan x). Blok diagram sistem pengendali umpan balik keadaan ditunjukkan pada Gambar 4.

Untuk mengetahui besarnya nilai x digunakan persamaan ruang-keadaan (*state-space equation*) seperti berikut :

$$\begin{aligned}\hat{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}\tag{1}$$

A, B, C dan D masing-masing merupakan matriks yang menunjukkan hubungan antara masukan u , keluaran y , keadaan x dan perubahan keadaan terhadap waktu x dot. Blok diagram yang menunjukkan hubungan antara masukan u , keadaan x dan keluaran y ditunjukkan pada kotak tebal di bagian atas Gambar 4. Seringkali nilai besaran-besaran operasional yang menentukan keadaan reaktor tidak dapat diukur. Bila hal seperti ini terjadi, maka penentuan nilai G_c menjadi tidak mungkin. Untuk itu digunakan rangkaian tambahan yang disebut *state estimator* yang digunakan untuk memprakirakan nilai keadaan x . *Estimator* menggunakan sinyal masukan u dan keluaran y sebagai masukan dan keluarannya adalah sinyal x prakiraan. Blok diagram sistem pengendali dengan *estimator* ditunjukkan pada Gambar 5.

Pada Gambar 5 nilai *gain* G_c yang merupakan besaran skalar digantikan oleh nilai lain yang ditentukan oleh vektor F. Bila penentuan besarnya nilai F dilakukan dengan metoda optimasi, maka sistem pengendalinya disebut sistem pengendali optimal. Dalam metoda pengendalian optimal besarnya nilai masukan u ditentukan oleh kuadratik *performance index* $J(u)$

$$J(u) = \|x(t_f) - r_d(t_f)\|_H^2 + \int_{t_0}^{t_f} [\|x(t) - r_d(t)\|_Q^2 + \|u(t)\|_R^2] dt\tag{2}$$

dengan t_0 = waktu mulai

t_f = waktu berakhir

x, u = vektor keadaan dan pengendali sebagai fungsi waktu

r_d = vektor keadaan referensi yang diinginkan sebagai fungsi waktu

H, Q dan R masing-masing merupakan *weighting matrix* untuk keadaan pada akhir pengendalian, masa pengendalian dan awal pengendalian. Vektor r_d diperoleh dengan mencari nilai minimum dari kuadratik *performance index* J di atas. Untuk sistem yang linear dan memiliki komponen noise dalam proses, maka metoda yang dipakai untuk mendapatkan nilai minimum disebut metoda *linear quadratic gaussian*. Sesudah vektor r_d diperoleh, selanjutnya dilakukan perhitungan *gain* umpan balik F melalui penyelesaian persamaan Ricatti seperti berikut

$$A^T F + FA - FBR^{-1}BF + Q = 0\tag{3}$$

PEMODELAN REAKTOR DAYA

Reaktor daya yang digunakan untuk menguji rancangan sistem pengendali umpan balik keadaan yang telah dioptimasi yang dibahas di atas adalah jenis reaktor air tekan (*pressurized water reactor*). Karena tidak mungkin menggunakan reaktor yang sebenarnya, pengujian dilakukan menggunakan model yang dibuat berdasarkan metoda kinetika titik dengan satu kelompok neutron kasip [4]. Secara matematis model tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta\rho - \beta}{\Lambda} n + \lambda c \quad (4)$$

dan

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} n - \lambda c \quad (5)$$

dengan

n \equiv rapat neutron (n/cm^3)

c \equiv rapat *precursor* neutron ($atom/cm^3$)

λ \equiv tetapan peluruhan radioaktif *precursor* efektif (s^{-1})

Λ \equiv waktu hidup neutron *prompt* efektif (s)

β \equiv fraksi neutron kasip

$\delta\rho \equiv \frac{k-1}{k} \equiv \text{reaktivitas}$

Untuk mendapatkan kondisi yang lebih mendekati keadaan reaktor yang sebenarnya dimasukkan juga perhitungan dampak umpan balik suhu baik suhu elemen bakar mau pun suhu pendingin. Perhitungan dilakukan menggunakan dua mekanisme umpan balik suhu untuk PWR (*pressurized water reactor*) yang dapat dituliskan dalam bentuk seperti berikut :

$$P_c(t) = \Omega(T_f - T_c) \quad (6)$$

dan

$$P_e(t) = M(T_l - T_e) \quad (7)$$

dengan

P_c \equiv daya yang dipindahkan dari elemen bakar ke pendingin (MW)

P_e \equiv daya yang dilepas dari pendingin (MW)

Ω \equiv koefisien perpindahan panas antara elemen bakar dengan pendingin (MW/ $^{\circ}C$)

M \equiv laju aliran masa dikalikan kapasitas panas air (MW/ $^{\circ}C$)

T_f \equiv suhu rata-rata elemen bakar ($^{\circ}C$)

T_l \equiv suhu air yang keluar reaktor ($^{\circ}C$)

T_e \equiv suhu air yang masuk reaktor ($^{\circ}C$)

T_c \equiv suhu rata-rata pendingin reaktor $(T_l + T_e) / 2$

Rumusan persamaan diferensial untuk suhu elemen bakar dan pendingin yang menyatu selanjutnya dapat dituliskan sebagai

$$f_f P_a(t) = \mu_f \frac{d}{dt} T_f + P_c(t) \quad (8)$$

dan

$$(1 - f_f) P_a(t) + P_c(t) = \mu_c \frac{d}{dt} T_c + P_c(t) \quad (9)$$

dengan

f_f = fraksi daya reaktor yang tersimpan dalam elemen bakar

μ_f = kapasitas panas total elemen bakar dan bahan struktur

μ_c = kapasitas panas total pendingin reaktor

$P_a(t) = P_{0a} n_r(t)$ = daya reaktor pada saat t (MW)

P_{0a} = keseimbangan awal level daya (MW)

Masukan reaktivitas dan umpan baliknya ke persamaan kinetika titik dinyatakan oleh

$$\frac{d\delta\rho_r}{dt} = G_r z_r \quad (10)$$

dan

$$\delta\rho = \delta\rho_r + \alpha_f (T_f - T_{f0}) + \alpha_c (T_c - T_{c0}) \quad (11)$$

dengan

$\delta\rho_r$ = reaktivitas yang ditimbulkan oleh batang kendali

z_r = kecepatan batang kendali

G_r = *reactivity worth* batang kendali per satuan panjang

α_f = koefisien reaktivitas suhu elemen bakar

α_c = koefisien reaktivitas suhu pendingin

T_{f0} = keseimbangan awal suhu elemen bakar (kondisi tunak)

T_{c0} = keseimbangan awal suhu pendingin (kondisi tunak)

Untuk memudahkan perhitungan dan penerapan sistem pengendali umpan balik keadaan persamaan-persamaan yang menunjukkan model reaktor daya di atas diubah kedalam bentuk matriks ruang-keadaan (*state-space*). Bentuk matriks A adalah sebagai berikut :

$$A = \begin{bmatrix} -\beta / \Lambda & \beta / \Lambda & \alpha_f / \Lambda & \alpha_c / 2\Lambda & 1 / \Lambda \\ \lambda & -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ f_f P_{0a} / \mu_f & 0 & -\Omega / \mu_f & \Omega / 2\mu_f & 0 \\ (1 - f_f) P_{0a} / \mu_c & 0 & \Omega / \mu_c & -(2M + \Omega) / 2\mu_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Data-data yang digunakan untuk perhitungan dalam model reaktor diambil dari reaktor *Three-Mile-Island* seperti terlihat pada Tabel 1 [5].

HASIL DAN ANALISA

Dari hasil perhitungan dan simulasi yang dilakukan menggunakan model reaktor daya yang dibahas diatas diperoleh hasil seperti yang akan dibahas berikut ini. Dari hasil perhitungan gain untuk sistem pengendali klasik diperoleh nilai $G_c = 0,5$ sedangkan untuk sistem pengendali optimal diperoleh nilai gain F sebesar $-0,001018$, $-0,2262$, $-0,0003967$, $-0,000227$ dan $-45,12$ dengan *weighting factor* $r = 1000$. Hasil simulasi masing-masing sistem pengendali untuk perubahan daya reaktor dari 1 ke 1,1 ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.

Dari hasil simulasi yang dilakukan terlihat tanggapan sistem pengendali optimal dalam memenuhi permintaan perubahan daya dari 1 ke 1,1 lebih cepat dari tanggapan sistem pengendali klasik. Daya reaktor yang diatur dengan sistem pengendali optimal mencapai nilai yang diinginkan dalam waktu 25 detik, sedangkan pada sistem pengendali klasik memerlukan waktu 30 detik. Kecepatan batang kendali pada sistem pengendali klasik mengalami perubahan secara tajam pada bagian awal sesaat setelah menerima sinyal permintaan perubahan daya. Perubahan yang mendadak seperti ini tidak begitu disukai, karena berdampak pada keselamatan. Hal ini terjadi karena *gain* sistem pengendali klasik yang bernilai tunggal berbeda dengan *gain* sistem pengendali optimal yang mempunyai beberapa nilai berkaitan dengan jumlah besaran operasional yang mempengaruhi keadaan reaktor.

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan simulasi yang telah dilakukan dapat disimpulkan, bahwa sistem pengendali optimal memiliki kemampuan tanggap lebih cepat dibandingkan dengan sistem pengendali klasik. Hal ini tercapai melalui penentuan *gain* umpan balik yang bernilai tidak tunggal tetapi sebanyak jumlah besaran

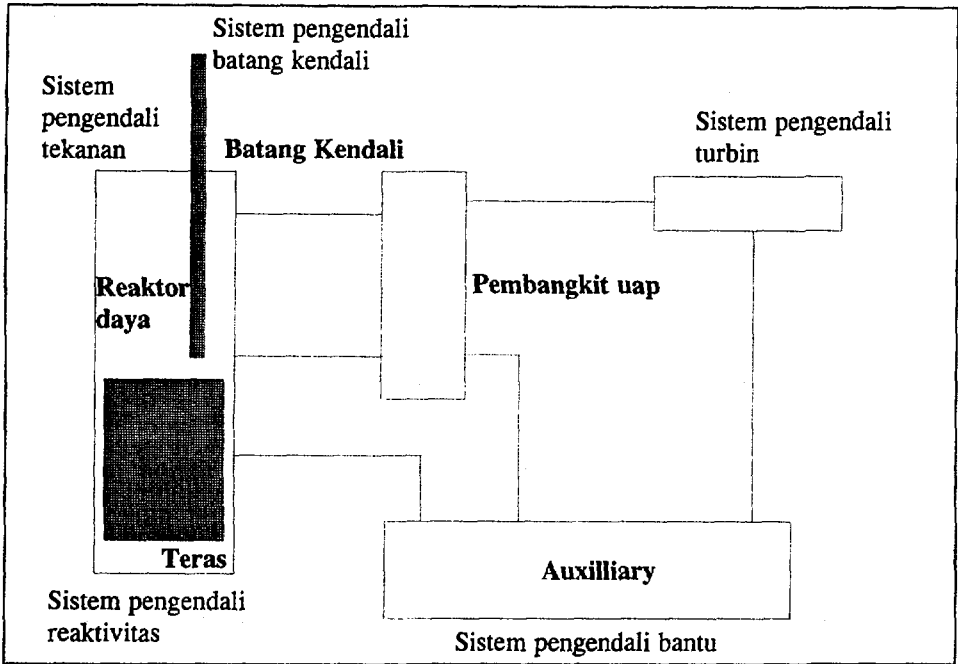
operasional yang mempengaruhi keadaan reaktor daya. Meskipun demikian pemanfaatan sistem pengendali optimal masih memerlukan sejumlah penelitian lanjutan. Hal ini disebabkan model reaktor daya yang digunakan pada penelitian ini masih sangat sederhana.

DAFTAR PUSTAKA

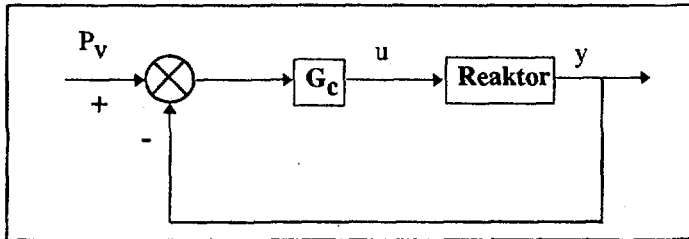
1. OGURI, K., "*Synthesis of Digital Control Systems for Nuclear Reactors, (I): Optimal Solutions to Power Change Control Problems*", J. Nucl. Sci. Technol., **12**[7], 391-401 (1975)
2. OGURI, K., "*Synthesis of Digital Control Systems for Nuclear Reactors, (II): Synthesis of Closed-Loop Control System*", J. Nucl. Sci. Technol., **13**[6], 286-303 (1976)
3. BROGAN, W.L., "*Modern Control Theory*", Prentice Hall International, Inc., New Jersey (1991)
4. WEAVER, L.E., "*Reactor Dynamics and Control*", American Elsevier Publishing Company, Inc., New York (1968)
5. EDWARDS, R.M., LEE, K.Y., SCHULTZ, M.A., "*State Feedback Assisted Classical Control: An Incremental Approach to Control Modernization of Existing and Future Nuclear Reactors and Power Plants*", Nucl. Tech. **92**, 167-185 (1990)

Tabel 1. Data untuk Pemodelan Reaktor Daya

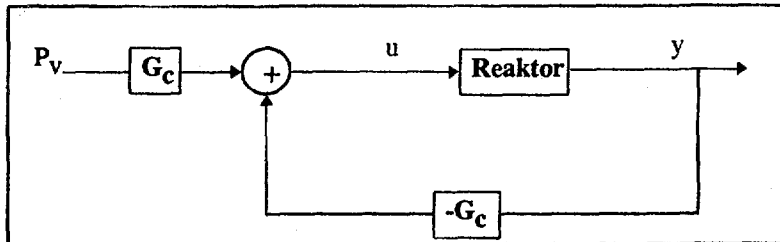
β	0,0065	λ	0,124 s ⁻¹
Λ	0,0001 s	f_f	0,98
G_r	0,01	T_e	290 °C
P_{0a}	2500 MW	μ_c	70,5 MW/°C
μ_f	26,3 MW.s/°C	M	92,8 MW/°C
Ω	6,53 MW/°C	α_c	+0,00001 reaktivitas /°C
α_f	-0,00005 reaktivitas/°C		



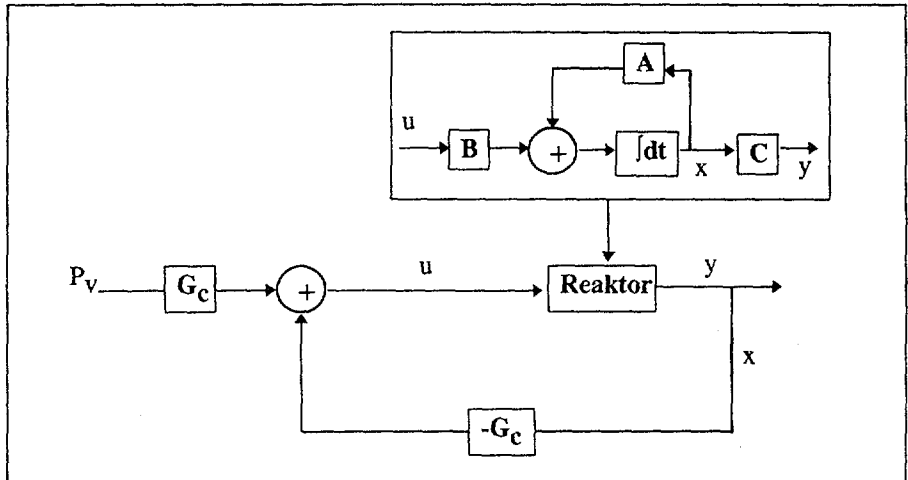
Gambar 1. Sebagian Sistem Pengendali PLTN Tipe Air Tekan



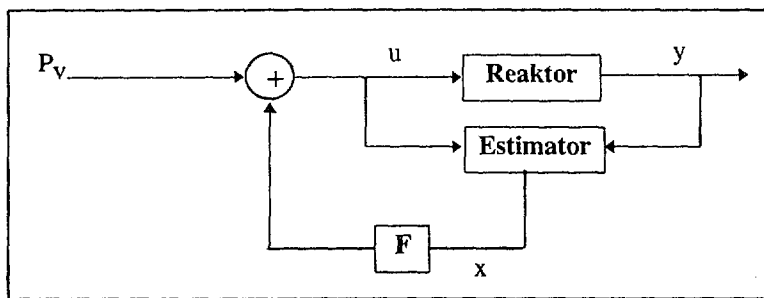
Gambar 2. Blok Diagram Sistem Pengendali Klasik



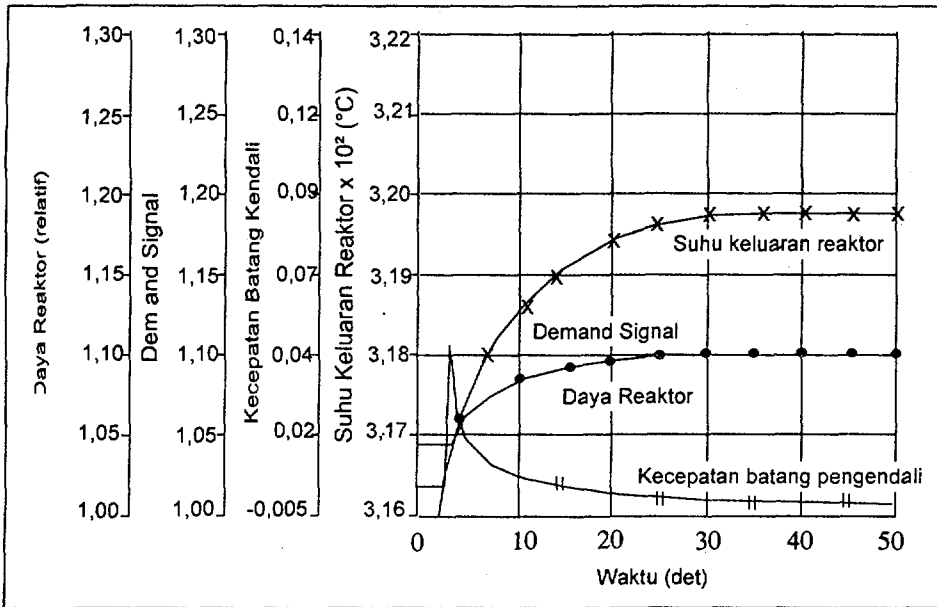
Gambar 3. Blok Diagram Sistem Pengendali Klasik dengan Posisi Gain pada Alur Umpan Balik



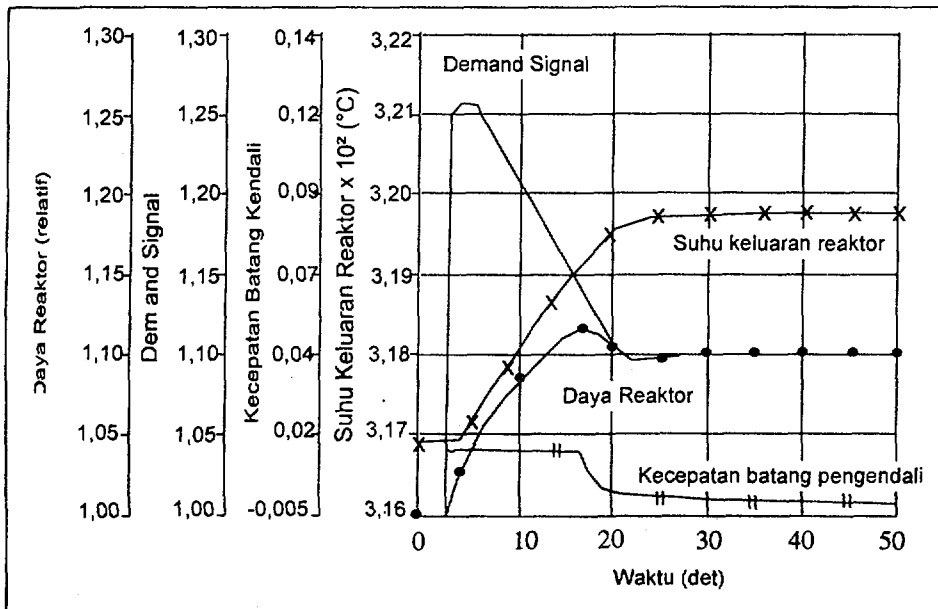
Gambar 4. Blok Diagram Sistem Pengendali Umpan Balik Keadaan



Gambar 5. Blok Diagram Sistem Pengendali Umpan Balik Keadaan Dengan Estimator



Gambar 6. Hasil Simulasi dengan Sistem Pengendali Klasik



Gambar 7. Hasil Simulasi dengan Sistem Pengendali Optimal

DISKUSI

SONY

Apakah ada bukti yang mendukung sehingga dikatakan sistem optimasi ini lebih baik dari sistem PID? Padahal diketahui bahwa sistem PID sudah teruji keandalannya, sedang kalau dihitung sistem optimasi ini mempunyai perbedaan 16,67% dari sistem PID.

SARWO D. DANUPOYO

Bukti-bukti penggunaan sistem optimasi ini lebih baik dari sistem PID dapat ditemui pada banyak paper mengenai non PLTN, sedang untuk PLTN hampir tidak ada.

RPH ISMUNTOYO

1. Dalam metode klasik keandalan sistem kendali ditingkatkan dengan penggunaan azas *redundancy* dan *diversity*. Bagaimana penerapan sistem optimasi untuk peningkatan keandalan?
2. Reaktor daya mempunyai watak yang kompleks, dalam LQG dikerjakan dengan linierisasi, seberapa jauh ketelitian dapat dicapai dengan metode ini?

SARWO D. DANUPOYO

1. Dalam penerapannya, peningkatan keandalan pada sistem ini sama dengan sistem klasik, karena konsep *redundancy* menuntut adanya lebih dari satu pengendali untuk satu parameter yang dikendalikan, sedang konsep *diversity* diaplikasikan dengan menggunakan *hardware* yang berbeda (bukan metode pengendalian).
2. Metode LQG digunakan untuk melinearisasi sistem-sistem non-linear agar tidak kehilangan sifatnya.

DJOKO HARI NUGROHO

Constraint untuk sistem kendali optimal Anda adalah waktu. Bagaimana jika *constraint* pada disain pengontrol Anda dimasukkan unsur efisiensi bahan bakar, efisiensi bahan batang kendali, efisiensi *feed water system* dsb? Bagaimana Anda mengkomodasikan hal ini agar sistem ini dapat dimanfaatkan untuk PLTN?

SARWO D. DANUPOYO

Dalam penelitian ini digunakan model yang sangat sederhana sehingga *constraint* hampir tidak berperan. Tetapi dalam model yang lebih kompleks akan diteliti pengaruh *constraint* tersebut.

TUKIRAN S.

1. Apakah estimator yang Anda gunakan dibuat sendiri atau dibeli?
2. Mengapa neutron kasip dibuat satu kelompok sedang kenyataannya ada 6 kelompok, dan bagaimana cara membuatnya?

SARWO D. DANUPOYO

1. Estimator dirancang sendiri secara *software*, bukan *hardware*.
2. Neutron kasep dipilih satu kelompok karena data valid yang ada hanya untuk satu kelompok. Data satu kelompok diperoleh dengan mengambil rata-rata dari 6 kelompok.

**NEXT PAGE(S)
left BLANK**