

PEMBATASAN REAKTIVITAS PADA PENGENDALIAN DAYA REAKTOR

Sarwo D. Danupoyo
PPTN - BATAN

ABSTRAK

PEMBATASAN REAKTIVITAS PADA PENGENDALIAN DAYA REAKTOR. Otomatisasi reaktor nuklir, khususnya reaktor riset, perlu dilakukan guna menurunkan kesalahan yang bersumber pada manusia. Salah-satu besaran operasi penting yang perlu dikendalikan secara otomatis adalah daya reaktor. Sampai saat ini pengendalian daya reaktor masih memerlukan campur tangan operator, karena kekurangan pada metode pengendalian konvensional yang digunakan. Makalah ini membahas pengaturan daya reaktor secara otomatis melalui pembatasan reaktivitas (reactivity constraint). Pembatasan reaktivitas diperlukan untuk mengatasi masalah yang ada pada metode pengendalian klasik yaitu terjadinya overshoot dan/atau undershoot pada saat terjadi alih keadaan. Metode pembatasan reaktivitas dikembangkan dari persamaan periode dinamis yang menghasilkan periode reaktor sesaat sebagai fungsi reaktivitas dan laju perubahan reaktivitas. Melalui uji coba secara eksperimental pada reaktor riset MITR-II pengaturan daya reaktor secara otomatis dengan metode pembatasan reaktivitas terbukti berlangsung dengan baik.

ABSTRAK

REACTIVITY CONSTRAINT ON THE REACTOR POWER CONTROL. Automation of nuclear reactors, especially research reactors, needs to be done in order to avoid human error that raise from human. One of the important operation parameters that should be automatically controlled that of a reactor power. Until now, the reactor power control still need an operator intervention due to lack of recently used conventional control method. This paper describes the automation of a reactor power controlled by reactivity constraint. Reactivity constraint is needed to solve the problem that is present in the classic control method, e.g., overshoot and/or undershoot at transient condition. Reactivity constraint method is developed from the dynamic period equation, which gives the instantaneous reactivity period as a junction of the reactivity and the rate of change of reactivity. By experimental testing in the MITR-II research reactor, automatic controlling of the reactor power by reactivity constraint method proved to be good.

PENDAHULUAN

Sampai saat ini pengaturan daya reaktor masih merupakan masalah pelik bagi operator, khususnya pada saat terjadi alih keadaan (*transient*). Hal ini disebabkan perubahan daya merupakan faktor utama yang mempengaruhi keselamatan reaktor, dan karenanya harus dilakukan secara bertahap dan berhati-hati. Pengaturan daya reaktor umumnya dilakukan dengan memasukkan reaktivitas sampai periode stabil yang ditentukan tercapai. Daya kemudian diizinkan naik atau turun secara eskponensial pada periode tersebut sampai mendekati level daya yang diinginkan. Periode kemudian diperpanjang secara bertahap dengan menurunkan reaktivitas, sedemikian sehingga daya mencapai levelnya secara mulus. Aspek yang paling sulit dan

menentukan dalam proses pengendalian adalah pemanjangan periode reaktor harus diawali sebelum daya mencapai level yang ditentukan. Tindakan antisipasi tersebut diperlukan karena laju pengurangan reaktivitas berhingga, khususnya bila batang pengendali digunakan pada kecepatan normal. Dengan demikian, jika perubahan daya reaktor ingin dicapai secara berdaya guna tanpa mengganggu keselamatan sistem harus digunakan metode yang dapat menentukan waktu yang tepat untuk mengawali proses pengurangan reaktivitas. Metode konvensional yang digunakan saat ini masih belum memadai yang mengakibatkan terjadinya *overshoot* dan/atau *undershoot* pada saat terjadi perubahan daya reaktor.

Makalah ini membahas metode pembatasan reaktivitas untuk mengatasi masalah di atas. Pembatasan reaktivitas merupakan sebuah

metode digital untuk kondisi pengendalian ikal tertutup yang mengandung pengaruh umpan balik tak linier. Metode ini berfungsi dengan cara membatasi reaktivitas bersih sedemikian sehingga periode reaktor tak berhingga selalu dapat dibuat pada titik akhir alih keadaan yang diinginkan dengan membalikkan arah gerak batang pengendali. Metode pembatasan reaktivitas diperoleh dari persamaan periode dinamis yang penurunannya dibahas pada bagian awal makalah. Uji coba sistem pengendali yang dirancang berdasarkan metode pembatasan reaktivitas yang dilakukan pada reaktor riset MITR-II milik *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) ditunjukkan pada bagian akhir.

PERSAMAAN PERIODE DINAMIS

Keadaan dinamika reaktor umumnya dibentuk dari persamaan kinetika titik (*point kinetics*) [1][2]. Namun demikian, keadaan dinamika reaktor dapat juga dibentuk dari periode reaktor sesaat yang didefinisikan sebagai

$$\tau(t) = \frac{l}{\omega(t)} \quad [3],$$

dengan :

$$T(t) \equiv \omega(t)T(t) \quad (1)$$

$T(t)$ menunjukkan fungsi amplitudo yang merupakan penjumlahan seluruh neutron yang ada dalam reaktor dan (t) adalah kebalikan periode reaktor dinamis. Menggunakan definisi periode sesaat pada persamaan (1), persamaan pertama dan kedua kinetika titik dapat dituliskan sbb.:

$$\omega(t)T(t) = \frac{p(t) - \bar{\beta}}{l} T(t) + \sum \lambda_i C_i(t) \quad (2)$$

dan

$$C_i(t) = \frac{\bar{\beta}}{l} T(t) - \lambda_i C_i \quad \text{for } i = 1, N \quad (3)$$

dengan

$\frac{\rho(t)}{l}$ = reaktivitas bersih

$\frac{\bar{\beta}}{l}$ = fraksi neutron kasip efektif

$\frac{\bar{\beta}_i}{l}$ = fraksi kelompok ke i neutron kasip efektif

l^* = waktu hidup neutron *prompt*

λ_i = tetapan peluruhan *precursor* kelompok ke i

$C_i(t)$ = konsentrasi *precursor* kelompok ke i

N = jumlah kelompok neutron kasip, biasanya enam

Langkah pertama dalam menurunkan persamaan periode dinamis adalah mendiferensialkan persamaan pertama kinetika titik. Kemudian dengan menggunakan definisi periode sesaat, maka faktor turunan fungsi amplitudo dapat diabaikan. Hasilnya dapat dituliskan seperti berikut:

$$\dot{\omega}(t)T(t) + [\omega(t)]^2 T(t) + \frac{\bar{\beta}}{l^*} \omega(t)T(t)$$

$$= \frac{\rho(t)}{l^*} T(t) + \sum \lambda_i \dot{C}_i(t)$$

(4)

Langkah selanjutnya meniadakan faktor laju perubahan konsentrasi *precursor* dengan memasukkan persamaan kedua kinetika titik. Hasilnya :

$$\dot{\omega}(t)T(t) + [\omega(t)]^2 T(t) + \frac{\bar{\beta}}{l^*} \omega(t)T(t)$$

$$= \frac{\rho(t)}{l^*} T(t) + \sum \lambda_i \frac{\bar{\beta}_i}{l^*} T(t) - \sum \lambda_i^2 C_i(t) \quad (5)$$

Untuk meniadakan faktor konsentrasi *precursor*, ($C_i(t)$) digunakan parameter peluruhan banyak kelompok efektif yang didefinisikan sebagai :

$$\lambda'_e(t) \equiv \sum \lambda_i^2 C_i(t) / \sum \lambda_i C_i(t) \quad (6)$$

Parameter ini merupakan besaran bergayut waktu. Nilainya bervariasi selama alih keadaan karena konsentrasi relatif berbagai kelompok neutron *precursor* kasip berubah bergantung pada laju kenaikan atau penurunan daya. Menggabungkan definisi tersebut dengan persamaan pertama kinetika titik menghasilkan :

$$\sum \lambda_i^2 C_i(t) = \lambda'_e(t) \left[\omega(t)T(t) + \frac{\bar{\beta} - \rho(t)}{l^*} T(t) \right] \quad (7)$$

Masukkan persamaan (7) ke persamaan (5), maka faktor konsentrasi *precursor* akan hilang seperti tampak pada persamaan berikut:

$$\dot{\alpha}(t) + [\alpha(t)]^2 \tau(t) + \frac{\beta - \rho(t)}{\lambda} \alpha(t) \tau(t) = \frac{\dot{\rho}(t)}{\lambda} \tau(t) + \frac{\sum \lambda_i \bar{\beta}_i}{\lambda} \tau(t) - \lambda'_c(t) \left[\alpha(t) \tau(t) + \frac{\beta - \rho(t)}{\lambda} \tau(t) \right] \quad (8)$$

Melalui pengolahan aljabar persamaan-persamaan tersebut di atas diperoleh periode reaktor sesaat yang dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\tau(t) = \frac{\beta - \rho(t)}{\dot{\rho}(t) + \lambda'_c(t) \rho(t) + \sum \bar{\beta}_i (\lambda_i - \lambda'_c(t))} \quad (9)$$

yang disebut sebagai persamaan periode dinamis (*dynamic period equation*) dengan $\rho(t)$ = laju perubahan reaktivitas bersih. Persamaan (9) menunjukkan bahwa periode reaktor merupakan fungsi reaktivitas, laju perubahan reaktivitas dan penyebaran neutron kasip. Merujuk pada persamaan tersebut daya reaktor dapat diatur melalui pengendalian laju perubahan reaktivitas. Hal ini menjadi dasar pengembangan metode pembatasan reaktivitas.

METODE PEMBATAHAN REAKTIVITAS[4]

Ketergantungan laju perubahan daya reaktor pada laju perubahan reaktivitas dan jumlah reaktivitas yang ada merupakan akibat dari perbedaan waktu antara pembentukan *precursor* dengan munculnya neutron kasip. Pembentukan hasil fisi, termasuk *precursor*, berbanding langsung dengan peralihan daya reaktor sementara neutron kasip tidak. Perubahan populasi neutron kasip tidak akan langsung berhenti sekalipun daya telah mencapai nilai yang diinginkan. Perubahan hanya akan berhenti bila populasi neutron kasip telah mencapai nilai keseimbangan untuk daya yang diinginkan. Karena itu jika daya ingin dicapai secara mulus, maka hal yang penting adalah membatasi peran neutron kasip sedemikian sehingga sesudah daya yang diinginkan tercapai, pemasukan batang pengendali akan membuat laju

perubahan neutron *prompt* cukup negatif untuk mengimbangi populasi neutron kasip yang terus naik. Kondisi ini hanya dapat tercapai bila reaktivitas bersih dibatasi (*constrained*) sedemikian sehingga penyebut pada persamaan (9) dapat dibuat lebih kecil atau sama dengan nol. Untuk alasan keselamatan, penyebut pada persamaan (9) selalu positif ($\rho \ll \bar{\beta}$). Dengan demikian, kondisi berikut harus dipenuhi :

$$\left\{ \lambda'_c(t) \rho(t) + \sum \bar{\beta}_i [\lambda'_c(t)] + \dot{\rho}_f \right\} \leq |\dot{\rho}_c| \quad (10)$$

dengan $\rho(t)$ merupakan reaktivitas bersih yaitu reaktivitas yang berasal dari batang pengendali dan reaktivitas yang berasal secara tidak langsung dari pengaruh umpan balik. Besaran ρ_f menunjukkan laju perubahan reaktivitas akibat pengaruh umpan balik termohidrolika, dan besaran $|\rho_c|$ menunjukkan kemungkinan laju perubahan reaktivitas maksimum yang dapat diperoleh bila batang pengendali digerakkan. $|\rho_c|$ selalu merupakan bilangan berhingga bukan nol tanpa menghiraukan batang pengendali digerakkan atau tidak. Secara nyata persamaan (10) menunjukkan bahwa pengaruh neutron kasip harus dibatasi ke suatu nilai yang dapat diimbangi oleh perubahan populasi neutron *prompt*.

Sekalipun persamaan (10) dapat dipahami dengan mudah secara teoritis, tetapi persyaratan tersebut tidak mudah dicapai dalam aplikasi nyata. Sebagai contoh, anggap bahwa kondisi yang ditetapkan oleh persamaan (10) terpenuhi selama tahap awal alih keadaan karena adanya laju perubahan reaktivitas negatif besar akibat umpan balik termal. Suku ρ_f akan menjadi nol pada saat reaktor mencapai kondisi tunak. Bila ρ_f mencapai nol lebih cepat daripada pengurangan $\lambda_c \rho$, maka kondisi untuk menghambat kenaikan daya tidak lagi mungkin dapat dipenuhi. Dengan kata lain, sekali pun ketidaksamaan pada persamaan (10) dapat dipenuhi pada permulaan, kondisi tersebut tidak akan dapat dipertahankan pada saat perubahan reaktivitas dimulai. Agar pembatasan reaktivitas lebih mudah diaplikasikan dalam kenyataan, perlu dilakukan penyederhanaan dengan menghilangkan suku-suku ρ_f

dan $\sum \beta_i (\lambda_i - \lambda'_e)$. Persamaan (10) selanjutnya dapat dituliskan dalam bentuk :

$$\left[\lambda'_e(t) \rho(t) \right] \leq \left| \dot{\rho}_c \right| \quad (11)$$

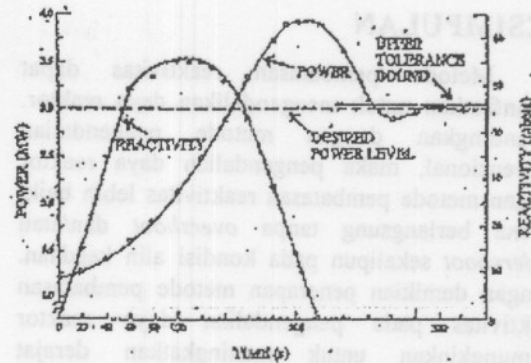
Persamaan (11) disebut pembatasan reaktivitas mutlak (*absolute reactivity constraint*). Di bawah pembatasan ini, pembalikan arah batang pengendali akan meniadakan pengaruh reaktivitas yang ada dan menciptakan periode tak berhingga selama alih keadaan. Pembatasan ini sangat konservatif, sehingga perlu diperlunak dengan memasukkan unsur waktu yang memadai. Selanjutnya persamaan (11) dapat dikembangkan menjadi :

$$\left[\rho(t) - \left| \dot{\rho}_c / \lambda'_e(t) \right| \right] / \left| \dot{\rho}_c \right| \leq \tau(t) \ln [P_f / P(t)]$$

Persamaan ini disebut pembatasan reaktivitas mencukupi (*sufficient reactivity constraint*). P_f dan $P(t)$ masing-masing menunjukkan daya yang diinginkan dan daya suatu saat, sedangkan $\tau(t)$ menunjukkan periode reaktor sesaat yang diamati atau periode asimtotik yang berhubungan dengan reaktivitas bersih. Sisi kiri *constraint* menunjukkan waktu yang diperlukan untuk membuang reaktivitas yang melebihi jumlah yang dapat dihapus oleh pembalikan arah batang pengendali. Waktu ini disebut *required time*. Sisi kanan *constraint* merupakan prakiraan waktu yang tersisa untuk mencapai daya penuh. Waktu ini disebut *available time*. Pembuangan reaktivitas dilakukan bila *required time* telah sama dengan *available time*.

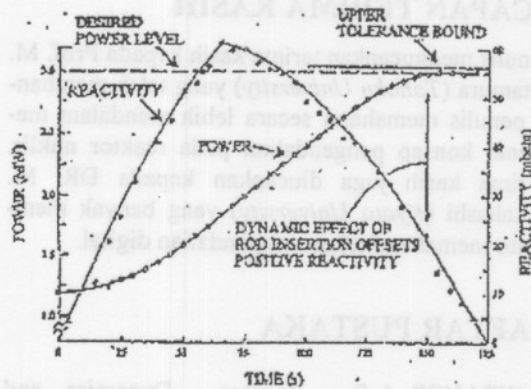
HASIL DAN ANALISIS

Untuk mengetahui keandalan metode pengendalian pembatasan reaktivitas yang dibahas di atas, dilakukan uji coba secara eksperimental pada reaktor riset MITR-II yang berdaya 5 MWt. Daya reaktor diubah dari 1 MWt menjadi 3 MWt. Sebagai pembandingan adalah pengendalian daya reaktor dengan metode konvensional yang tanpa pembatasan reaktivitas seperti yang tampak pada Gambar 1.



Gambar 1. Pengendalian daya reaktor tanpa pembatasan reaktivitas.

Tampak jelas daya reaktor mengalami *overshoot* dan *undershoot* sebelum mencapai kondisi stabil yang diinginkan yaitu 3 MWt. Keadaan ini terjadi karena reaktivitas yang ada tidak dapat dibuang oleh pengendali dengan kecepatan yang memadai. Akibatnya neutron kasiip naik dengan kecepatan melebihi penurunan neutron *prompt*.



Gambar 2. Pengendalian daya reaktor dengan pembatasan reaktivitas.

Gambar 2 menunjukkan hasil pengendalian daya dengan pembatasan reaktivitas. Perubahan daya dilakukan menggunakan *shim blade* dengan *differential worth* ~ 8,15 mbeta/s. Terlihat reaktivitas mulai dikurangi pada saat daya mencapai nilai 2,25 MWt yaitu saat *required time* dan *available time* bernilai sama. Adanya pembuangan reaktivitas ini menyebabkan terjadinya perubahan laju perubahan daya reaktor sedemikian sehingga daya reaktor dapat mencapai nilai yang diinginkan secara mulus tanpa *overshoot* dan *undershoot*.

KESIMPULAN

Metode pembatasan reaktivitas dapat dimanfaatkan untuk mengendalikan daya reaktor. Dibandingkan dengan metode pengendalian konvensional, maka pengendalian daya reaktor dengan metode pembatasan reaktivitas lebih baik, karena berlangsung tanpa *overshoot* dan/atau *undershoot* sekalipun pada kondisi alih keadaan. Dengan demikian penerapan metode pembatasan reaktivitas pada pengendalian daya reaktor memungkinkan untuk meningkatkan derajat otomatisasi pengendalian. Kelebihan lain dari metode pembatasan reaktivitas adalah dampak linierisasi yang umumnya muncul pada metode pengendalian lain dapat diabaikan, karena persamaan periode dinamis yang menjadi dasar pengembangan metode pembatasan reaktivitas tidak dipengaruhi oleh linierisasi. Dengan demikian, metode pembatasan reaktivitas lebih dapat diandalkan dalam mengendalikan sistem yang tak linier.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. M. Kitamura (*Tohoku University*) yang telah membantu penulis memahami secara lebih mendalam mengenai konsep pengendalian pada reaktor nuklir. Terima kasih juga diucapkan kepada DR. M. Takahashi (*Kyoto University*) yang banyak membantu memahami teknik pengendalian digital.

DAFTAR PUSTAKA

1. WEAVER, L.E., *Reactor Dynamics and Control*, American Elsevier Publ. Comp., Inc., New York (1968)
2. SCHULTZ, M.A., *Control of Nuclear Reactors and Power Plants*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York (1961)
3. BERNARD, J.A., LANNING, D.D., *Issues in the Closed-Loop Digital Control of Reactor Power: the MIT Experience*, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-33, 1, 992 (1986)
4. BERNARD, J.A., HENRY, A.F., LANNING, D.D., *Application of the Reactivity Constraint Approach to Automatic Reactor Control*, Nucl. Sci. Eng., 98, 87 (1988)

TANYA JAWAB

Djen Djen

- Metode pembatasan ini berupa alat atau code/software ?
- Apakah metode ini pernah diterapkan pada reaktor sesungguhnya bagaimana hasilnya?

Sarwo D.D

- *Metode software (teoritis)*
- *Ya, diuji coba pada reaktor riset MTR-II milik MIT Amerika*

Syarip

- Periode reaktor sebagai fungsi 'penyebaran' neutron kasip, apa maksudnya?
- Pembalikan arah batang kendali apa maksudnya? (apakah penyisipan dan penarikan ke dalam teras reaktor ?) jika itu yang dimaksud sebaiknya istilahnya bukan "pembalikan arah"

Sarwo D

- *Dari hubungan matematis untuk persamaan periode reaktor terlihat ada komponen neutron kasip. Jadi distribusi neutron kasip mempengaruhi periode reaktor.*
- *Maksudnya arah batang kendali dibuat berlawanan dengan arah bila reaktivitas ditambah.*

Heryuda Kusumo

- Mohon dijelaskan tentang pengertian "pembatasan reaktivitas", Karena sepengetahuan saya "pembatasan reaktivitas" ini dikaitkan dengan jumlah reaktivitas lebih maksimum yang masih diperkenankan untuk suatu reaktor nuklir dengan menyetimbangkan "Stuck rod criteria", dimana pada kondisi ini batang kendali reaktor masih mampu mempertahankan kondisi subkritis reaktor. Apakah ada pengertian lain tentang pembatasan reaktivitas ini ?
- Berapa nilai "pembatasan reaktivitas" yang diperkenankan?

Sarwo DD

- *"Pembatasan reaktivitas" memiliki pengertian, reaktivitas sesudah naik mencapai nilai yang diperlukan untuk suatu level daya tidak diperkenankan naik lagi (dibatasi) dengan membalik arah batang kendali. Dalam pembatasan reaktivitas semua kriteria keselamatan tetap diperhitungkan, dan untuk itu yang digunakan adalah sufficient reactivity constraint.*
- *Nilai tidak dihitung, karena parameter kontrolnya adalah required time = available time.*