

# PENGEMBANGAN SIMULATOR UNTUK PENGENDALIAN REAKTOR DAYA TIPE PWR

Deswandri

\*Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - Batan  
Puspiptek – Serpong, Gedung No. 80, Tangerang  
wandri@batan.go.id

## ABSTRACT

*The load following operation is a mode of operation, where the power level of nuclear power reactor is adjusted based on the load fluctuation at the electric grid. The changes of power level cause unbalance in the reactor. In order to keep the stability of reactor, it needs a specific control method. Three control methods for the PWR type reactors were developed for that purpose. Each method was tested by a numerical simulation, respectively. Since these methods were tested separately, however, it is difficult to compare the performance of all methods directly using the same initial parameters and various standard power patterns. In this work, we developed the simple simulator to simulate the control methods of PWR during the load following operation. By using the standard daily power patterns, it was showed that the simulator could be used well and all results agree with the previous results of the three control methods above. By using the same initial parameters and power pattern, the simulator could directly show the characteristic, superiority and disadvantage of each control method, respectively.*

**Keywords:** PWR, Load Following Operation, Control Method, Simulator, Axial Offset

## PENDAHULUAN

Operasi mengikuti beban adalah salah satu cara pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), di mana pada operasi ini daya reaktor divariasikan mengikuti fluktuasi beban listrik pada jaringan transmisi. Tipe operasi ini biasanya diterapkan pada suatu PLTN yang terjaring pada suatu jaringan interkoneksi bersama pembangkit listrik konvensional lainnya dan jumlah pasokan listrik dari PLTN tersebut ke jaringan cukup besar.

Berbeda dengan pengoperasian secara beban tetap, pengoperasian PLTN dengan mengikuti beban memerlukan strategi pengendalian khusus. Saat reaktor beroperasi secara setimbang dengan daya konstan, perubahan daya sebagai respons dari perubahan beban listrik pada jaringan mengakibatkan perubahan pada parameter fisika teras. Untuk menjaga kesetimbangan teras, peralatan kendali harus diatur sedemikian rupa untuk mengkompensasi perubahan parameter fisika

teras tersebut. Problem utama dalam pengaturan ini adalah bagaimana menyisipkan atau menarik batang kendali dalam *timing* yang tepat untuk mengendalikan perubahan distribusi daya dan seberapa banyak konsentrasi boron ditambahkan atau dikurangi agar supaya limbah air yang dihasilkan dalam proses tersebut dapat diminimalkan.

Problem-problem tersebut diatasi dengan mengembangkan metode pengendalian, sebagaimana yang sudah dilakukan dalam penelitian sebelumnya<sup>1,2</sup>. Ada tiga metode pengendalian yang telah dikembangkan, yaitu pengendalian berdasarkan nilai batas *axial offset*, pengendalian berdasarkan prioritas reaktivitas dan pengendalian berdasarkan lintasan tiga *axial offset*. Ketiga metode tersebut sudah diuji melalui simulasi numerik. Akan tetapi karena diuji secara terpisah, unjuk kerja ketiga metode tersebut untuk parameter awal dan variasi pola daya harian yang sama sulit dibandingkan secara langsung.

Pada kegiatan ini, sebuah simulator sederhana dikembangkan dengan menggunakan bahasa program Visual Basic 6.0, untuk menyimulasikan pengendalian teras reaktor PWR dalam operasi mengikuti beban. Dengan menggunakan pola daya harian standar PWR, karakteristik, keunggulan serta kekurangan ketiga metode pengendalian tersebut di atas dipelajari.

## MODEL PENGENDALIAN

Parameter utama yang dikendalikan dalam operasi mengikuti beban adalah distribusi daya dan reaktivitas. Pengendalian distribusi daya bertujuan untuk menjaga nilai *peaking factor* dalam batas yang aman, sehingga integritas bahan bakar dapat terjamin. Pengendalian reaktivitas ditujukan untuk mempertahankan kekritisan reaktor pada level daya berapa saja dioperasikan. Kinerja metode pengendalian dinilai dari kemampuan meminimalisasi pemakaian batang kendali dan pengaturan konsentrasi boron serta stabilisasi distribusi daya.

### Metode Pengendalian Berdasarkan Nilai Batas AOP

Pada metode pengendalian berdasarkan nilai batas AOP<sup>1</sup>, seluruh gerakan batang kendali ditujukan untuk mengontrol perubahan distribusi daya, yang diwakili oleh parameter *axial offset* (AOP). Secara matematis AOP dapat ditulis sebagai:

$$AOP = \frac{P_t - P_b}{P_t + P_b} \quad (1)$$

dimana:

$P_t, P_b$  : daya (lokal) relatif pada separuh bagian atas dan bagian bawah teras (%)  
 $P$  : daya relatif keseluruhan teras (%)

Karena hanya batang kendali yang dapat mengontrol distribusi daya, seluruh gerakan batang kendali ditujukan hanya untuk mengontrol nilai AOP dalam nilai batas yang diizinkan, tanpa memperhatikan perubahan reaktivitas yang disebabkan oleh gerakan tersebut. Perubahan reaktivitas dikontrol dengan pengaturan deviasi temperatur teras rata-rata dan konsentrasi boron dalam teras.

Gerakan batang kendali dipicu oleh nilai AOP. Jika nilai AOP menyimpang dari nilai

maksimum yang diizinkan, batang kendali disisipkan ke dalam teras sampai AOP kembali ke dalam nilai batas. Sebaliknya, jika AOP melampaui nilai batas minimum, batang kendali ditarik sampai AOP kembali ke dalam nilai batas. Secara skematis, prosedur pengendalian pada metode ini diperlihatkan pada Gambar 1.

Perubahan posisi batang kendali dalam aksi pengendalian dapat dihitung dengan persamaan berikut.

Jika nilai AOP lebih besar dari nilai batas maksimum

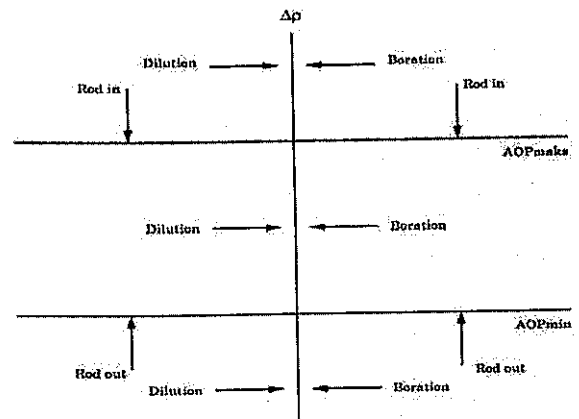
$$R_i = R_{i-1} - \frac{(AOP_{Max} - AOP)}{ACR} \quad (2)$$

Jika nilai AOP lebih kecil dari nilai batas minimum

$$R_i = R_{i-1} - \frac{(AOP_{Min} - AOP)}{ACR} \quad (3)$$

dimana:

$R_i$  : posisi batang kendali pada step  $i$   
 $R_{i-1}$  : posisi batang kendali pada step  $i-1$   
 $AOP, AOP_{max}, AOP_{min}$  : nilai *axial offset* aktual, maksimum dan minimum  
 $ACR$  : asio perubahan AOP(%) terhadap perubahan posisi batang kendali (%)



**Gambar 1.** Prosedur pengontrolan pada metode pengendalian nilai batas AOP

### Metode Pengendalian Berdasarkan Prioritas Reaktivitas

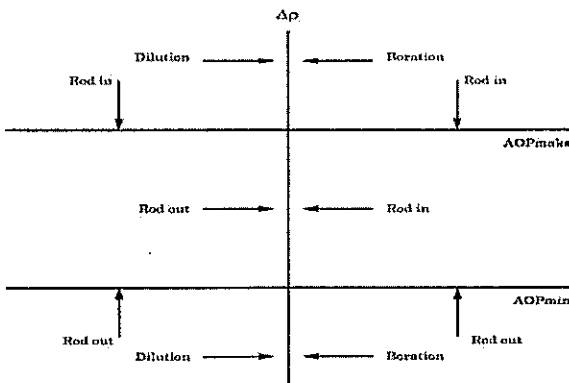
Pada metode pengendalian berdasarkan prioritas reaktivitas<sup>1</sup>, pengendalian reaktivitas ditempatkan pada prioritas yang lebih tinggi.

Semua peralatan kendali difungsikan secara bergantian untuk mengendalikan perubahan reaktivitas.

Alat kontrol pertama adalah pengaturan temperatur teras rata-rata. Jika parameter lain dalam teras tetap, reaktor yang mempunyai koefisien temperatur negatif akan kritis hanya pada satu temperatur tertentu. Sebagai akibat dari *power defect*, reaktivitas berubah ketika level daya dirubah. Perubahan ini dikompensasi dengan memvariasikan temperatur teras rata-rata dalam nilai batas tertentu yang diizinkan. Jika temperatur tersebut melampaui nilai batas, alat kontrol yang lain digunakan untuk mengkompensasinya.

Alat kontrol kedua adalah batang kendali. Batang kendali digerakkan untuk mengkompensasi sisa perubahan reaktivitas yang sebelumnya sudah dikontrol temperatur teras. Parameter pembatas untuk gerakan batang kendali adalah nilai AOP. Batang kendali hanya dapat digerakkan sepanjang nilai AOP masih dalam nilai batas. Apabila AOP melampaui nilai batas, gerakan batang kendali dihentikan atau dipindahkan ke arah yang berlawanan untuk mengembalikan AOP ke dalam nilai batas.

Alat kontrol ketiga adalah pengaturan konsentrasi boron dalam teras. Konsentrasi boron dalam teras diatur untuk mengkompensasi sisa perubahan reaktivitas yang sudah diredam oleh peralatan kendali sebelumnya. Jika perubahan reaktivitas menuju ke nilai positif, larutan boron ditambahkan ke dalam teras melalui proses *boration*. Dan jika perubahan reaktivitas menuju nilai negatif, konsentrasi boron dalam teras dikurangi melalui proses *dilution*. Prosedur metoda ini diperlihatkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Prosedur pengontrolan metode pengendalian prioritas reaktivitas

## Metode Pengendalian Berdasarkan Lintasan Tiga *Axial Offset*

Konsep lintasan tiga *axial offset* (*three axial offsets trajectory method*) dikembangkan oleh Y. Shimazu<sup>3,4</sup>. Tidak seperti metode konvensional yang menggunakan satu parameter *axial offset* (AOP), konsep ini mendefinisikan dua parameter *axial offset* baru, yaitu AOI dan AOX. AOP adalah *axial offset* konvensional yang didefinisikan sebagai rasio perbedaan daya reaktor pada separuh bagian atas dengan separuh bagian bawah teras. AOI dan AOX masing-masing didefinisikan sebagai *axial offset* dari distribusi daya yang akan memberikan distribusi *iodine* dan *xenon* aktual dalam kondisi setimbang. Definisi matematis AOI dan AOX masing-masing dapat ditulis sebagai berikut.

$$AOI = \frac{P_{it} - P_{ib}}{P_{it} + P_{ib}} \quad (4)$$

$$AOX = \frac{P_{xt} - P_{xb}}{P_{xt} + P_{xb}} \quad (5)$$

dimana:

$P_{it}, P_{ib}$  : daya relatif pada separuh bagian atas dan bagian bawah teras yang akan memberikan konsentrasi *iodine* dalam kondisi setimbang (%)

$P_{xt}, P_{xb}$  : daya relatif pada separuh bagian atas dan bagian bawah teras yang akan memberikan konsentrasi *xenon* dalam kondisi setimbang (%)

Dua parameter baru, *DAOPX* dan *DAOIX*, dapat didefinisikan dan secara matematis ditulis sebagai:

$$DAOPX = AOP - AOX \quad (6)$$

$$DAOIX = AOI - AOX \quad (7)$$

Apabila *DAOPX* and *DAOIX* diplot dalam bidang x-y, kurva akan membentuk sebuah lintasan elips. Apabila diberikan perubahan negatif terhadap AOP (misalnya dengan penyisipan batang kendali), lintasan kurva akan bergerak sejajar dengan sumbu-x ke arah negatif. Sebaliknya, jika diberikan perubahan positif (batang kendali ditarik), lintasan akan bergerak sejajar sumbu-x ke arah positif.

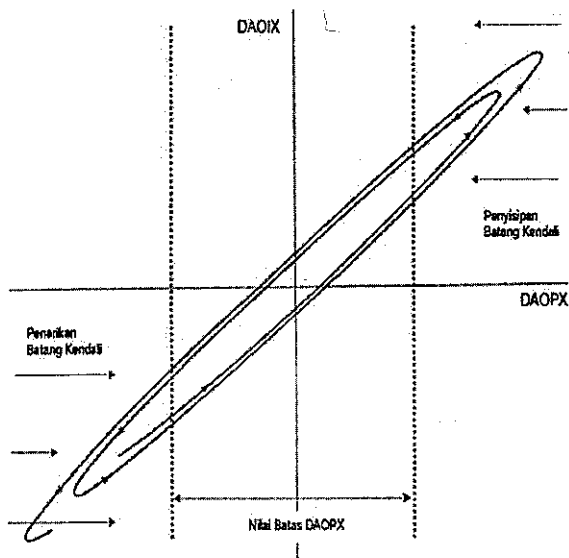
Prinsip utama pada metode ini adalah bagaimana membawa lintasan kurva sedekat mungkin dengan sumbu koordinat. Secara umum, prosedur pengendalian dapat dilakukan sebagai berikut<sup>2</sup>: Pertama-tama nilai batas *DAOPX* ditetapkan agar aksi pengendalian tidak terlalu ketat. Selanjutnya, gerakan batang kendali diatur berdasarkan pada nilai *DAOPX*. Batang kendali mulai disisipkan apabila lintasan kurva melampaui nilai minimum. Jumlah penyisipan atau penarikan batang kendali ditetapkan sebagai fungsi linear dari *DAOPX*, yang secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$\Delta R = K \times DAOPX \quad (8)$$

dimana:

- = jumlah penarikan atau penyisipan batang kendali (%)
- = konstanta penyalaras (*adjustment value*).

Selanjutnya, perubahan reaktivitas dikendalikan oleh pengaturan deviasi temperatur teras rata-rata dan larutan boron. Prosedur pada metode ini diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Prosedur pengontrolan pada metoda lintasan tiga *axial offset*

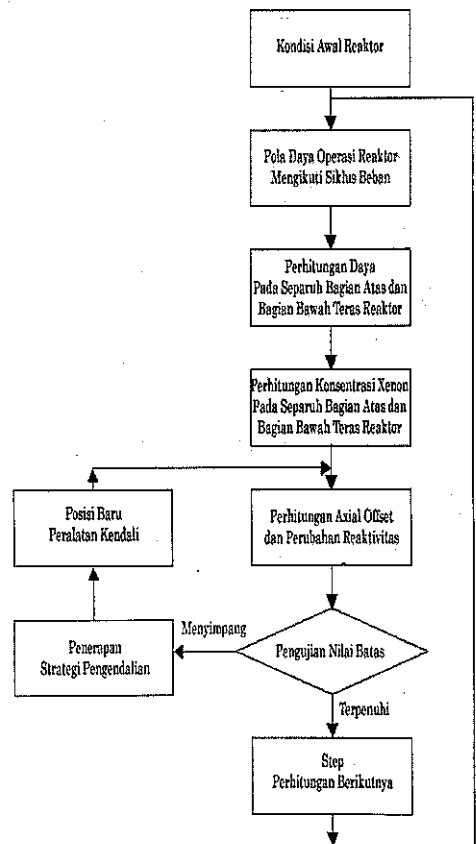
## METODOLOGI PENGEMBANGAN SIMULATOR

### Alur Perhitungan pada Simulator

Langkah pertama yang dilakukan dalam simulator adalah membaca kondisi awal reaktor dan pola daya yang digunakan. Berdasarkan pada parameter awal, simulator menghitung daya reaktor pada lokasi separuh bagian atas dan

separuh bagian bawah teras. Perhitungan daya pada kedua lokasi ini dilakukan dengan menggunakan Persamaan 1, dimana nilai AOP dan daya total awal diberikan.

Berdasarkan pada nilai daya pada kedua lokasi tersebut konsentrasi xenon pada separuh bagian atas dan separuh bagian bawah teras ditentukan. Selanjutnya simulator melakukan perhitungan AOP dan perubahan reaktivitas. Apabila AOP dan perubahan reaktivitas melampaui nilai batas, posisi peralatan kendali diatur dengan menggunakan salah satu metode pengendalian. Posisi baru peralatan kendali digunakan untuk menghitung kembali AOP dan perubahan reaktivitas, apabila persyaratan nilai batas terpenuhi, perhitungan dilanjutkan ke langkah berikutnya. Langkah-langkah perhitungan seperti yang telah dijelaskan diatas secara skematis digambarkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Alur perhitungan pada simulator

### Format Tampilan Simulator

Halaman pertama untuk tampilan simulator adalah *Form Input*, seperti yang terlihat pada Gambar 4. Form ini digunakan untuk pengesetan kondisi awal teras dan pola daya yang dipakai.

The screenshot shows a software window titled 'Form Input' with several input fields and buttons. The fields are organized into sections: 'Pola Daya' (Power Pattern) with values for Daya Maks (100), Daya Min (50), Wkt Kontrol (0), Wkt Teras (3), Wkt Kontrol (6), Wkt Naik (3), and Wkt Kontrol (12); 'Nilai Awal dan Kondisi Teras' (Initial Values and Conditions) with values for Nilai Awal AOP (-5), Deviasi AOP (10), Posisi Awal Batang Kendali (95), Konsentrasi Awal Boron (800), and Faktor Perubahan Batang Kendali (1.5); and 'Status Bahan Bakar' (Fuel Status) with radio buttons for BOC, MOC, and EOC (MOC is selected). At the bottom, there are two buttons: 'Jalankan Simulasi' (Run Simulation) and 'Exit'.

Gambar 5. Form input simulator

Dalam operasi mengikuti beban, daya reaktor divariasikan di antara daya maksimum dan minimum, biasanya antara 100% sampai 50% daya normal. Daya reaktor tidak mungkin divariasikan persis mengikuti pola fluktuasi beban listrik yang sebenarnya terjadi pada jaringan transmisi. Pola daya yang dipakai adalah pola yang mendekati pola fluktuasi beban tersebut. Sebagai contoh, daya awal reaktor diasumsikan sama dengan daya maksimum. Kemudian daya reaktor diturunkan menuju daya minimum dalam selang waktu 3 jam. Reaktor akan beroperasi secara konstan pada daya minimum dalam selang waktu 6 jam. Selanjutnya daya reaktor dinaikkan kembali menuju daya maksimum dalam waktu 3 jam dan beroperasi kembali pada daya maksimum selama 12 jam. Pola daya yang diberikan dalam contoh ini adalah pola daya harian 3-6-3-12, yang merupakan pola daya standar untuk reaktor tipe PWR dari perusahaan Westinghouse <sup>5</sup>.

Sebelum simulasi dijalankan, pemakai harus mengisi nilai awal dan kondisi teras pada *form Input*. Seperti yang dicontohkan pada Gambar 5, nilai awal AOP adalah -5% dan nilai deviasi 10%. Posisi awal batang kendali diset 95%. Nilai persentase ini diambil secara terbalik, artinya apabila batang kendali disisipkan seluruhnya ke dalam teras reaktor maka posisi batang kendali bernilai 0%, sebaliknya bila ditarik seluruhnya dari teras maka nilainya 100%. Konsentrasi awal boron dalam teras diset 800 ppm.

Faktor perubahan batang kendali digunakan apabila pemakai menggunakan metode pengendalian berdasarkan lintasan tiga *axial offset*. Faktor ini berhubungan dengan konstanta

penyelaras pada Persamaan 8. Dalam contoh ini, faktor tersebut diset pada angka 1,5. Tujuan pengesetan ini adalah agar supaya penyisipan dan penarikan batang kendali tidak terlalu cepat atau tidak terlalu lambat.

*Form simulasi* digunakan sebagai tempat untuk menampilkan hasil simulasi berdasarkan metode pengendalian yang dipilih. Ada dua bentuk hasil simulasi yang ditampilkan pada simulator ini. Pertama, adalah *plotting* pola daya yang dipilih dan pergerakan atau perubahan peralatan kendali untuk mengkompensasi perubahan AOP dan reaktivitas dalam teras akibat perubahan daya. Kedua adalah tabel jumlah kumulatif pemakaian batang kendali dan jumlah kumulatif limbah air yang timbul dalam pengaturan konsentrasi boron dalam teras selama aksi pengendalian.

Perintah *atur input* digunakan untuk mengatur kembali *setting* masukan program yang terdapat pada *form input*. Apabila perintah ini diklik, maka *form simulasi* ditutup dan layar berpindah pada *form input*. Perintah *Bersihkan Layar* digunakan untuk membersihkan kurva *plotting* dan isi tabel dari hasil simulasi sebelumnya. Perintah *Print* adalah perintah untuk mencetak hasil simulasi pada *printer*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi yang ditampilkan pada Gambar 6 dilakukan oleh simulator berdasarkan nilai masukan seperti yang terdapat pada Gambar 5. Ada lima kurva yang ditampilkan, masing-masing kurva pola beban, pergerakan batang kendali, deviasi temperatur teras rata-rata, konsentrasi boron, dan nilai *axial offset*. Pada tabel terisi persentase pemakaian batang kendali (persentase terhadap panjang total batang kendali), jumlah air limbah yang timbul akibat proses *boration* dan *dilution* serta jumlah air limbah total yang timbul akibat kedua proses tersebut.

Besarnya jumlah penggunaan batang kendali berhubungan dengan efektivitas penggunaan batang kendali. Semakin kecil nilainya, semakin efektif pemakaian batang kendali dan semakin mudah bagi operator dalam menggerakkan batang kendali tersebut.

Jumlah limbah air yang timbul berhubungan dengan pengaturan konsentrasi boron dalam teras. Proses *dilution* adalah proses untuk mengurangi konsentrasi boron dalam teras dengan cara menginjeksi air murni ke dalam teras.

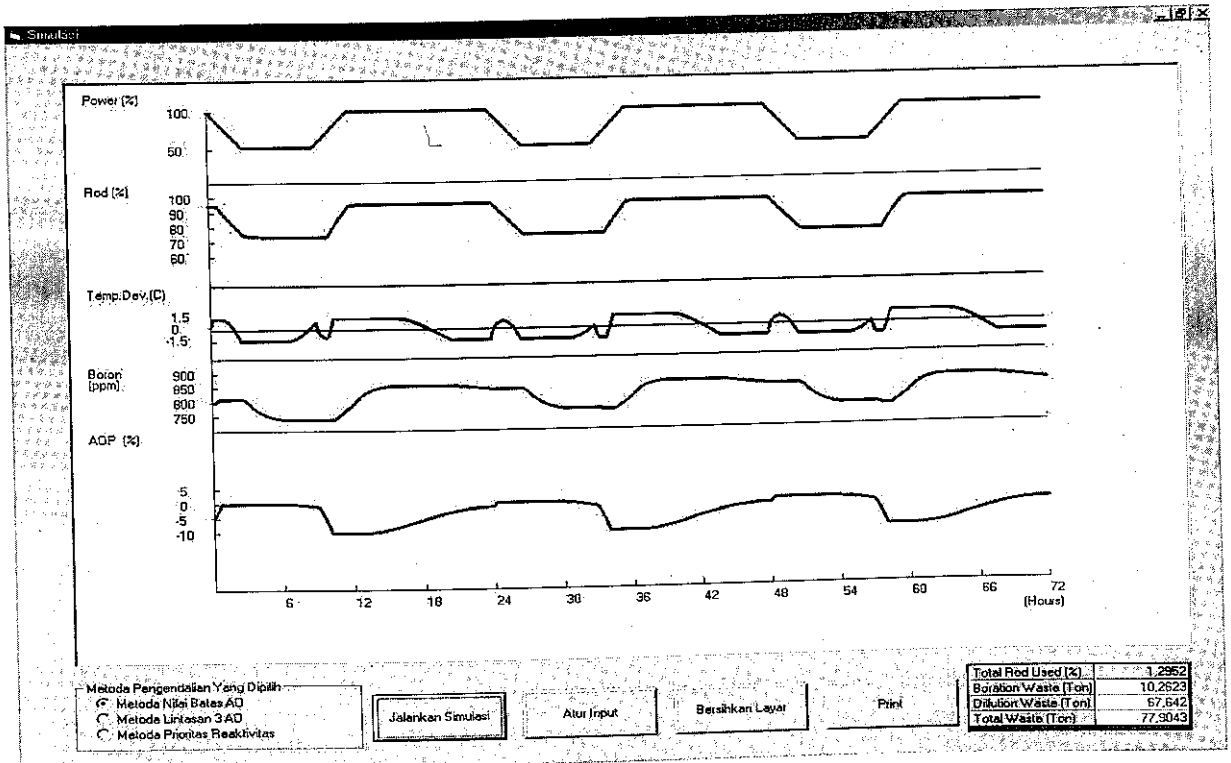
Sebagai konsekuensinya, sejumlah air pada waktu yang bersamaan harus dikeluarkan dari teras, agar supaya jumlah total air dalam teras tidak berubah. Air yang keluar dari teras tersebut adalah air limbah yang telah terkontaminasi bahan radioaktif, sehingga memerlukan proses dekontaminasi lebih lanjut. Proses *boration* adalah proses untuk meningkatkan konsentrasi boron dalam teras dengan cara menginjeksikan cairan yang mengandung boron konsentrasi tinggi ke dalam teras. Dalam proses ini sejumlah air teras juga harus dikeluarkan. Dengan demikian, jumlah air limbah yang dihasilkan menunjukkan efektivitas metode pengendalian yang dipilih dalam pengaturan konsentrasi boron <sup>2</sup>.

Gambar 7 dan 8 adalah hasil yang ditampilkan oleh simulator, masing-masing untuk metode pengendalian lintasan 3 AO dan metode pengendalian prioritas reaktivitas. Sedangkan Gambar 9 adalah hasil simulasi untuk ketiga metode pengendalian yang dilakukan secara berurutan tanpa mengeklik perintah *Bersihkan Layar*.

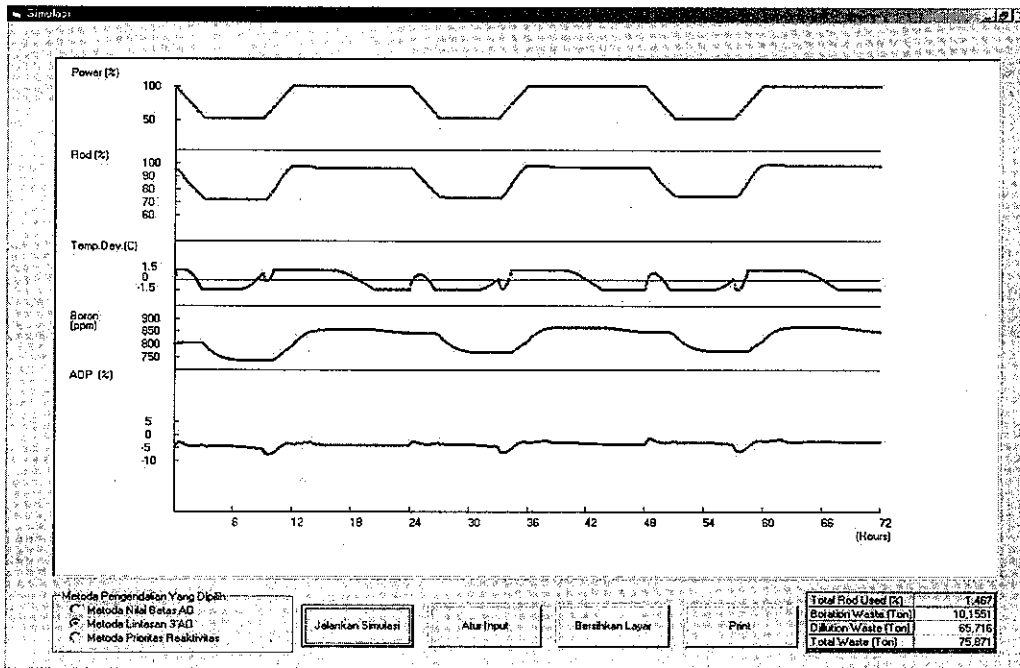
Simulasi yang dilakukan seperti pada Gambar 9 ditujukan untuk membandingkan ketiga metode pengendalian di atas. Pada simulasi ini parameter pada *Form Input* dirubah di mana waktu naik dan turun daya diset selama 1,5 jam dan nilai awal AOP diset 0. Dari gambar terlihat

jelas perbedaan cara penggunaan peralatan kendali untuk masing-masing metode. Dengan patokan nilai batas AOP tidak terlampaui, masing-masing metode menggunakan batang kendali dan pengaturan konsentrasi boron seperti yang terlihat pada gambar. Semakin banyak perubahan lintasan kurva batang kendali, semakin besar nilai jumlah pemakaian batang kendali dan berarti semakin berkurang efektivitas pemakaian batang kendali. Demikian pula dengan pengaturan konsentrasi boron, semakin besar deviasi boron dalam teras selama aksi pengendalian semakin besar jumlah limbah air yang timbul.

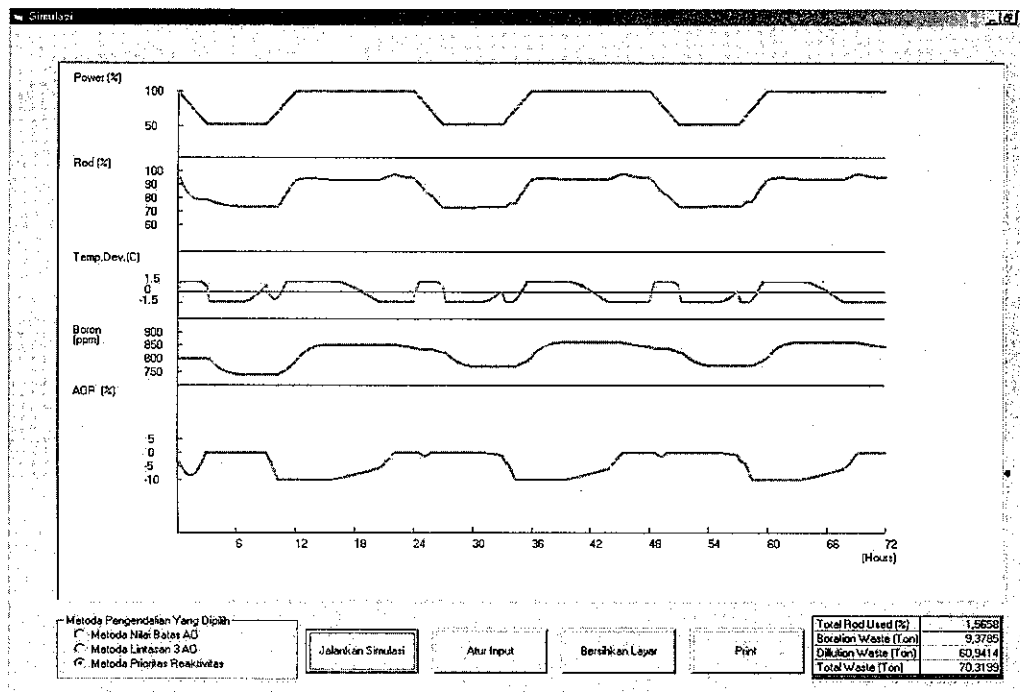
Gambar 9 memperlihatkan bahwa gerakan batang kendali pada metode pengendalian nilai batas AO (garis biru) lebih sederhana dibandingkan dengan metoda pengendalian lintasan 3 AO (garis merah) dan metode pengendalian prioritas reaktivitas (garis biru terang). Hal ini berarti bahwa metode pengendalian nilai batas AO menggunakan batang kendali lebih efisien daripada metode pengendalian lainnya. Untuk pengaturan konsentrasi boron, metoda pengendalian prioritas reaktivitas menghasilkan deviasi lebih kecil dibandingkan dengan metoda lainnya, sehingga limbah air yang dihasilkan lebih sedikit. Untuk stabilitas distribusi daya (diwakili oleh parameter AOP), metode pengendalian lintasan 3 AO lebih



Gambar 6. Hasil simulasi metoda pengendalian nilai batas AO



Gambar 7. Hasil simulasi metoda pengendalian lintasan 3 AO



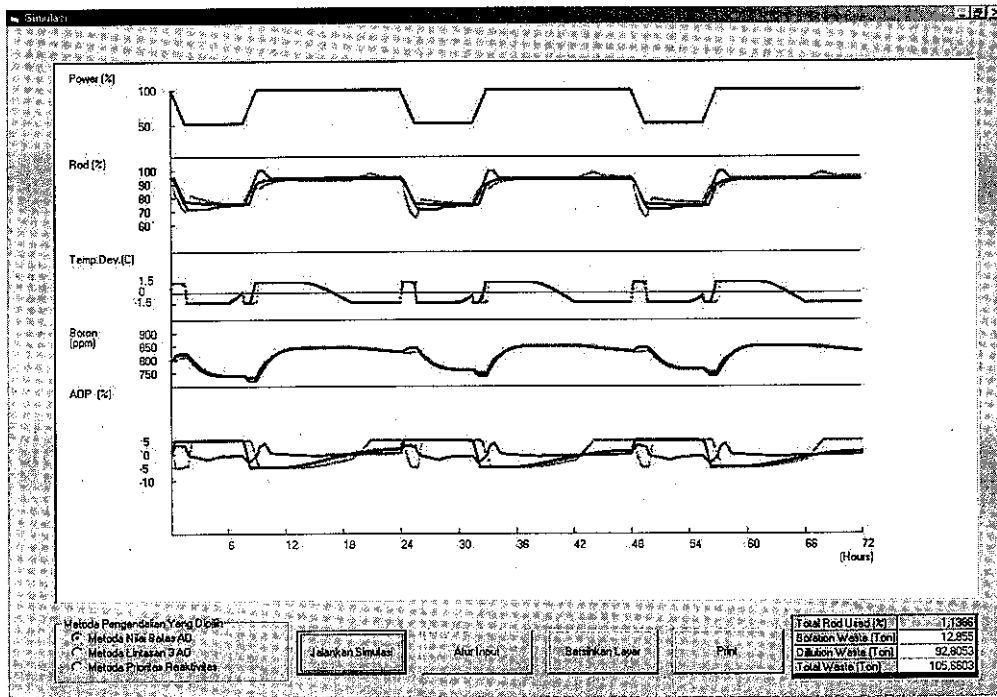
Gambar 8. Hasil simulasi metoda pengendalian prioritas reaktivitas

unggul dari yang lainnya, karena seperti yang terlihat dalam Gambar 10, fluktuasi AOP pada metode ini lebih kecil dari yang lainnya.

## KESIMPULAN

Simulator dapat mensimulasikan pengendalian teras reaktor daya tipe PWR dalam operasi mengikuti beban. Hasil pengujian memper-

lihatkan bahwa simulator dapat bekerja dengan baik dan hasil tidak memperlihatkan penyimpangan. Dengan kemudahan memvariasikan input pada simulator, ketiga metode pengendalian yang telah dikembangkan sebelumnya dapat dipelajari dan dibandingkan secara langsung. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode pengendalian nilai batas AO lebih



Gambar 9. Hasil simulasi tiga metode pengendalian

efisien menggunakan batang kendali, akan tetapi menghasilkan limbah air yang lebih banyak karena tidak efisien dalam pengaturan konsentrasi boron. Metode pengendalian prioritas reaktivitas lebih efisien dalam pengaturan boron (lebih sedikit limbah air), tetapi kurang efisien dalam pemakaian batang kendali. Metode pengendalian lintasan 3 AO memperlihatkan keunggulan dalam menjaga stabilitas distribusi daya, tetapi kurang efisien dalam pemakaian peralatan kendali.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Pusat Pengembangan Teknologi Keselamatan Nuklir – Batan yang telah mendanai penelitian ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Prof. Riset Dr. Ir. Tarzan Sembiring, yang telah memberikan bimbingan dalam pembuatan KTI pada Diklat Fungsional Peneliti Tingkat Pertama Gelombang XIII tahun 2008.

#### DAFTAR PUSTAKA

- <sup>1</sup>Deswandri. 2002. “Pengembangan Generator Strategi ntuk Manuver Teras Reaktor PWR”. Laporan Teknis P2TKN-Batan.
- <sup>2</sup>Deswandri dan Shimazu, Y. 2001. ”Application of Three Axial Offsets Trajectory Method for Load Follow Operation Control in PWRs”. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 38(10): 809–818
- <sup>3</sup>Shimazu, Y. 1992. “Direct Method of Search for Optimal Xenon Oscillation Control Based on New Concept of Axial Offsets”. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 29(10): 966–971
- <sup>4</sup>Shimazu, Y. 1996. “Modification of the Axial Offsets Trajectory Method to Control Xenon Oscillation during Load Following Operations”. *J. at Energy Soc. Jpn.*, 38(1): 54–58.
- <sup>5</sup>Huang, P.H. 1995. “Taiwan Power Company’s Power Distribution Analysis and Fuel Thermal Margin Verification Methods For PWRs”. *Nucl. Tech.*, 112: 214–226.