

SIMULATOR REAKTOR KARTINI SEBAGAI ALAT PERAGA OPERASI REAKTOR PENELITIAN TIPE TRIGA MARK II

Moch. Rosyid, Nur Hidayat, dan Jumari

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan BATAN
Jalan Babarsari PO BOX 6101, Yogyakarta 55282
E-mail: m_rosyid@batan.go.id

ABSTRAK

SIMULATOR REAKTOR KARTINI SEBAGAI ALAT PERAGA OPERASI REAKTOR PENELITIAN TIPE TRIGA MARK II Telah dibuat Simulator reaktor Kartini yang terdiri dari teras reaktor lengkap dengan bahan bakar, tiga batang kendali, pemegang batang kendali, motor penggerak batang kendali dan keyboard operasi yang dilengkapi dengan sistem interlock. Sistem interlock dibangun menggunakan mikrokontroler. Parameter yang dihasilkan selama reaktor beroperasi ditampilkan pada komputer dan monitor dengan program sistem informasi proses yang bekerja pada sistem operasi LINUX. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem interlock simulator memberikan unjuk kerja yang sama dengan operasional interlock keyboard pada SIK reaktor Kartini. Pada pengujian Sistem Informasi Proses didapatkan hasil bahwa kenaikan batang pengaman saja dari 0% sampai 100% menghasilkan daya 11,84 W dengan periode minimum 20 detik. Parameter daya dan periode ditampilkan dalam bentuk numeris dan grafik. Untuk keselamatan reaktor, kenaikan daya terlalu cepat dapat mengakibatkan *scram*, saat daya > 110% juga terjadi *scram*.

Kata kunci : Simulator, Sistem Instrumentasi dan Kendali (SIK)

ABSTRACT

KARTINI REACTOR SIMULATOR AS TOOL FOR SIMULATION OF TRIGA MARK II RESEARCH REACTOR OPERATION. *The Kartini reactor that consists of terrace; a replica of reactor core complete with it's fuels; three control rods and it's holder; motor actuator of control rod, and operation keyboard with interlock system have been made. The interlock system build by micro-controller. The parameters was resulted during reactor operate to be presented at monitor and computer with program of process information system which operation under LINUX operating system. The examination result indicate that system of interlock simulator give perform equal to operational of interlock keyboard at SIK (system of instrumentation and conduct) of Kartini reactor. At examination of Process Information System got result of that increase of just safety rod from 0% until 100% resulting 11,84 W power with 20 second minimum period. Power and period parameters are presented in bar-graph and numeric. For the reactor safety, the quickly increasing energy would result a scram, the rising energy until > 110% also happened scram.*

Keyword : Simulator, System Instrumentation and Conduct (SIC)

PENDAHULUAN

Nuklir untuk kesejahteraan semakin dirasakan manusia. Salah satunya adalah adanya isotop yang digunakan untuk perunut cadangan air bawah tanah, isotop untuk pemeriksaan fungsi ginjal dan lainnya. Isotop tersebut dapat dihasilkan di reaktor jenis TRIGA. TRIGA adalah singkatan dari *Training, Research, and Isotop production from General Atomic*. Reaktor TRIGA merupakan reaktor buatan General Atomic yang dapat digunakan untuk pelatihan karena dayanya yang kecil dan aman, untuk penelitian

baik pengendalian ataupun proses untuk memproduksi isotop melalui aktivasi neutron.

Di tahun 2013 ini, tepatnya Rabu, 18 September 2013, di ruang C3 Kantor Pusat IAEA, Wina, Austria dilakukan penandatanganan piagam kerjasama antar jejaring regional di bidang pendidikan ketenaganukliran, yaitu: ANENT (*Asian Network for Education in Nuclear Technology*), LANENT (*Latin-American Network for Education in Nuclear Technology*), AFRA-NEST (*AFRA Network for Education in Nuclear Science and Technology*), dan ENEN (*European Nuclear Education Network*)

Untuk sosialisasi cara kerja reaktor jenis TRIGA pada masyarakat dan untuk pelatihan, telah dibuat simulator reaktor Kartini yang digunakan sebagai alat peraga di Pusat Desceminasi Iptek Nuklir (PDIN) BATAN Jakarta. Simulator reaktor yang sama juga dipajang di anjungan IPTEK Taman Mini Indonesia Indah (TMII).

Pembatasan masalah

Ada beberapa parameter *interlock* yang tidak diterapkan dalam simulator ini seperti *interlock* level sumber, yaitu terkuncinya *keyboard* operasi karena sumber neutron terlalu kecil (bila pulsa dari penguat awal kurang dari 4 pulsa/detik batang kendali tidak bisa dinaikkan) kondisi ini ditampilkan pada indikator (Level-1). Parameter lain yang tidak diterapkan adalah ketersediaan catu daya listrik PLN yaitu indikator (Level-4); kegagalan catu daya tegangan tinggi untuk detektor *Fission Chamber* (FC) dan kegagalan catu daya tegangan tinggi untuk detektor *Compensated Ionization Chamber* (CIC).

Disamping keterbatasan parameter *interlock*, simulator ini hanya diberi satu buah tombol TRIP saja untuk melepas ketiga batang kendali, sedangkan pada SIK reaktor Kartini ada 3 buah tetapi dapat ditekan bersamaan.

Namun demikian dengan keterbatasan tersebut (hanya sistem *interlock* kenaikan batang kendali lebih dari satu tidak dapat dilakukan dan sistem *scram*), simulator ini diharapkan sudah dapat digunakan untuk peragaan dan pelatihan operator reaktor TRIGA MARK II dengan 3 buah batang kendali.

TEORI

Jika satu buah inti U^{235} ditabrak oleh partikel neutron thermal maka inti tersebut akan terbelah dan menghasilkan panas dan 2 atau 3 neutron cepat yang baru. Neutron tersebut akan menabrak inti U^{235} yang lain, inilah yang disebut dengan reaksi berantai. Namun, tidak semua neutron dapat menyebabkan pembelahan U^{235} . Hanya neutron termal saja (neutron dengan energi dibawah 1 eV) yang mempunyai kebolehhjadian lebih tinggi untuk menimbulkan reaksi fisi^[1]. Agar memiliki kebolehhjadian lebih tinggi untuk dapat menimbulkan reaksi fisi, neutron cepat harus diperlambat. Bahan yang dapat mengurangi kecepatan neutron

disebut dengan moderator. Bahan yang sering digunakan untuk moderator adalah air (H_2O), air berat (D_2O) dan grafit (*carbon*)

Pengendalian Daya

Kenaikan daya di dalam rektor disebabkan karena bertambahnya proses fisi yang terjadi di dalam reaktor, sehingga pengendalian daya dilakukan dengan cara mengendalikan jumlah populasi neutron yang berada dalam teras reaktor. Cara pengendalian jumlah neutron dilakukan dengan menyisipkan bahan penyerap neutron seperti Boron Carbida (B_4C) yang dikemas dalam bentuk batang kendali. Populasi neutron dapat dihitung dengan persamaan kinetika reaktor^[2]. Persamaan kinetika reaktor diturunkan atas dasar fenomena berikut:

1. Perubahan kerapatan fluks neutron per satuan waktu (dn/dt) merupakan kerapatan fluks neutron "prompt", ditambah fluks neutron kasip yang terbentuk per satuan waktu, dikurangi neutron yang tertangkap oleh inti induk.
2. Perubahan inti induk neutron kasip per satuan waktu = jumlah inti l yang tereksitasi karena menangkap neutron kasip per satuan waktu – jumlah inti l yang meluruh per satuan waktu.

Jika ditulis dalam bentuk persamaan :

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \tag{1}$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta n(t)}{\Lambda} - \lambda_i C_i(t) \tag{2}$$

catatan :

- $n(t)$: populasi neutron atau daya reaktor pada saat t
- $C_i(t)$: konsentrasi nuklida-nuklida *precursor* neutron kasip kelompok ke-i pada saat t
- Λ : Waktu generasi neutron
- β_i : fraksi neutron kasip kelompok ke-i
- β : fraksi total neutron kasip seluruh kelompok
- λ_i : tetapan peluruhan *precursor* neutron kasip kelompok ke-i
- $\rho(t)$: reaktivitas pada saat t
- t : perubahan waktu
- i : 1,2, ..., 6

Sifat dan karakter populasi neutron dalam sebuah reaktor nuklir ditentukan oleh stuktur

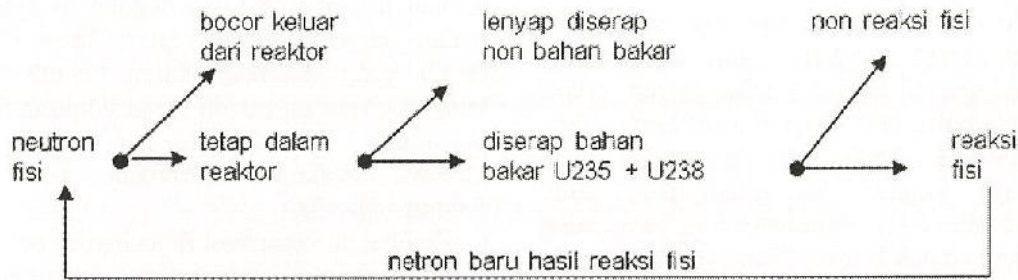
dan komposisi material dalam reaktor. Struktur dan komposisi material dalam reaktor harus dapat menjamin reaksi fisi berantai dapat dikendalikan [1].

Subkritis, kritis, dan superkritis

Siklus neutron dalam satu generasi ada yang bocor keluar, ada yang lenyap terserap non

bahan bakar seperti batang kendali, ada yang mati tanpa ada reaksi fisi dan ada yang sampai terjadi reaksi fisi sehingga lahir 2-3 buah neutron baru, seperti dijelaskan pada Gambar 1.

Dengan kondisi populasi neutron tersebut, pada setiap generasi akan muncul faktor perlipatan neutron k .



Gambar 1. Siklus neutron dalam reaktor berbahan bakar uranium

Faktor perlipatan neutron dalam reaktor nuklir didefinisikan sebagai :

$$k = \frac{N_1}{N_0} \tag{3}$$

dengan N_1 adalah jumlah neutron yang lahir atau disebut dengan neutron generasi baru dan N_0 adalah jumlah neutron pada generasi sebelumnya.

Dalam teori reaktor terdapat istilah khusus yang menyatakan kondisi reaktor yaitu: kondisi sub kritis jika $k < 1$; kondisi kritis jika $k = 1$ dan kondisi super kritis jika $k > 1$.

Hingga saat ini reaktor Kartini dioperasikan pada kondisi kritis pada daya 100 kW.

Periode reaktor

Periode reaktor didefinisikan sebagai selang waktu yang diperlukan untuk menaikkan daya reaktor sebesar e kalinya ($e = 2,71828$)^[3].

Secara matematik ditulis :

$$\frac{P_t}{P_0} = \exp^{t/T} \tag{4}$$

catatan : t adalah waktu dan

T adalah periode reaktor

Dengan demikian periode reaktor T dihitung dengan persamaan:

$$T = \frac{1}{\ln \frac{P_t}{P_0}} = \exp^{t/T} \tag{5}$$

$P(t)$ dan $P(0)$ masing-masing adalah daya reaktor dalam t detik dan daya reaktor pada saat awal

Sistem interlock

Prinsip pertama yang diterapkan dalam sistem *interlock* adalah naiknya batang kendali adalah disengaja oleh operator, sehingga untuk menaikkan batang kendali operator harus menekan tombol *UP* untuk batang kendali yang dikehendaki bersamaan dengan tombol *RELEASE*. Demikian juga untuk menurunkan batang kendali, tombol *DOWN* untuk batang kendali yang dikehendaki harus ditekan bersamaan dengan tombol *RELEASE*. Tanpa penekanan tombol *RELEASE* batang kendali tidak akan bergerak. Prinsip kedua adalah tidak diperbolehkan menaikkan lebih dari satu batang kendali secara bersamaan, karena akan mengakibatkan kenaikan suhu terlalu cepat, hal ini akan merusakkan selongsong bahan bakar. Oleh karena itu langkah tersebut dihalangi oleh

sistem *interlock*. *Interlock* tidak berlaku untuk menurunkan batang kendali. Diperbolehkan menurunkan dua atau tiga batang kendali secara bersamaan.

Prinsip ketiga adalah jika tombol *UP* dan tombol *DOWN* ditekan bersamaan maka batang kendali akan turun.

Operasional Reaktor

Reaktor Nuklir hanya boleh dioperasikan oleh operator yang memiliki Surat Ijin Bekerja (SIB) sebagai operator reaktor yang masih berlaku. Dalam pelaksanaan operasi, operator diawasi dan dibawah koordinasi supervisor reaktor [6].

Sebelum reaktor dioperasikan, peralatan bantu seperti *blower*, pompa pendingin primer, pompa pendingin sekunder, *demineralizer* dan lainnya harus sudah dihidupkan. Hal itu dibuktikan dengan isian *chek-list*. Disamping berisi data suhu ATR, debit pendingin primer, daya hantar air masukan dan keluaran *demineralizer*, *chek-list* juga berisi keterangan bahwa kalibrasi meter daya, % daya linier dan meter DPM (*Decade Per Minute*) telah dikalibrasi. *Cheklis* juga berisi pengujian *manual scram* telah dilakukan.

Scram adalah terlepasnya batang kendali dari pemegangnya dan jatuh kembali ke tempat semula. Setelah batang kendali jatuh maka pemegang batang kendali akan turun untuk kembali memegangnya.

Pengujian manual *scram* dilakukan untuk meyakinkan bahwa jika terjadi penyimpangan daya maka batang kendali benar-benar lepas, dilakukan dengan cara menaikkan batang kendali sampai 2% kemudian tombol *SCRAM* ditekan. Pengujian dilakukan pada ketiga batang kendali.

Start Up

Bila semua persiapan telah dilakukan dan instrumen bekerja dengan baik maka dengan persetujuan *supervisor* reaktor dapat di *start-up*. Waktu memulai *start-up* harus dicatat pada *log book*. *Start-up* secara manual dilakukan dengan cara :

1. Menaikkan batang Pengaman secara perlahan sampai *full-up* (100%) sambil mengamati DPM. Jangan sampai menunjuk angka 3.

2. Menaikkan batang Kompensasi secara perlahan sampai 1 kedudukan teras. ($\pm 70\%$) sambil mengamati DPM, jangan sampai menunjuk angka 3 dan perubahan tingkat daya jangan sampai menunjuk 110%.

3. Yang terakhir dinaikkan adalah batang Pengatur, juga secara perlahan sampai tingkat daya yang dikehendaki, sambil mengamati DPM, jangan sampai menunjuk angka 3, dan perubahan tingkat daya jangan sampai menunjuk 110%

Jika Sumber netron yang digunakan adalah Pu-Be maka pada daya 1 watt sumber tersebut harus dikeluarkan dari teras.

4. Mencatat waktu saat sumber netron dikeluarkan, catat juga posisi masing masing batang kendali dan tingkat daya saat sumber netron diambil. Penurunan daya setelah sumber netron diambil dikompensasi dengan menaikkan batang Pengatur sampai kondisi kritis.

5. Catat waktu kondisi kritis tercapai.

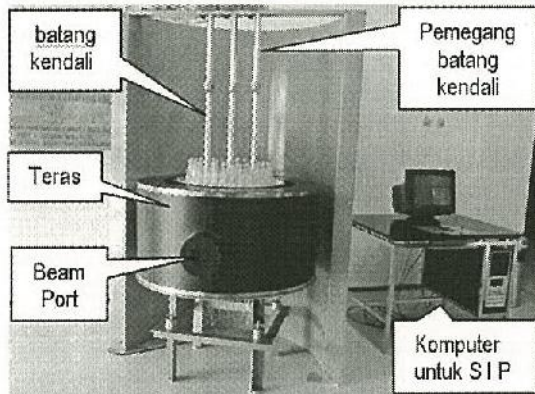
Shut Down normal

1. Menekan ketiga tombol *DOWN* secara bersamaan sampai semua batang kendali pada posisi bawah (0%)
2. Melakukan inspeksi pada batang kendali apakah benar-benar sudah berada pada posisi bawah.
3. Mengarahkan kunci pada posisi OFF dan kunci diambil.
4. Mematikan penyedia daya.
5. Mengamati suhu ATR (Air Tangki Reaktor) jika sudah rendah seperti sebelum operasi maka pompa primer dimatikan.
6. Mematikan sistem pendingin sekunder dan ventilasi.
7. Mencatat kondisi *shut down* reaktor pada *log book*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah dibuat simulator reaktor penelitian model TRIGA dengan tiga buah batang kendali, seperti dijelaskan pada Gambar 2.

Ada tiga bagian penting dalam simulator reaktor Kartini, yaitu teras reaktor Sistem kendali dan Sistem Informasi Proses (SIP).



Gambar 2. Simulator Reaktor

Teras reaktor

Sama dengan kondisi reaktor Kartini, pada teras reaktor terdapat *beamport*, replika bahan bakar dan replika 3 batang kendali (pengaman, kompensasi dan pengatur) dengan ukuran yang sama dengan aslinya (1:1)

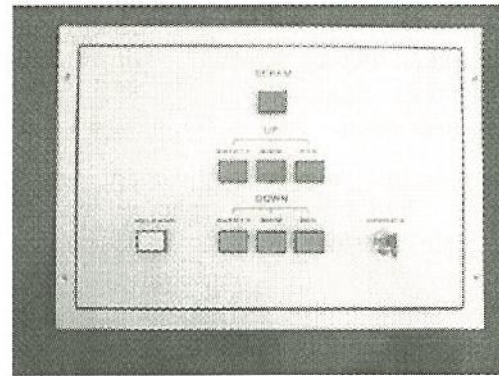
Sistem Kendali

Sistem kendali terdiri dari *keyboard* operasi yang dilengkapi sistem *interlock* dan monitor yang merupakan sistem informasi proses.

Keyboard operasi reaktor berupa 8 tombol dan kunci kontak. Kunci kontak sebagai pengaman agar reaktor tidak dioperasikan oleh orang yang tidak berhak.

Tiga buah tombol <UP> masing-masing digunakan untuk menaikkan batang kendali Pengaman (SAFE), batang Kompensasi (SHIM) dan batang Pengatur (REG). Tiga buah tombol <DOWN> masing-masing untuk menurunkan batang kendali dan tombol <SCRAM> untuk menjatuhkan batang kendali.

Sebuah tombol <RELEASE> warna kuning digunakan untuk memastikan bahwa operator sengaja menekan tombol <UP> atau sengaja menaikkan atau menurunkan atau menjatuhkan batang kendali, bukan karena tidak sengaja. Keyboard operasi dipaparkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Keyboard operasi

Sistem *interlock*.

Sistem *interlock* adalah sistem yang diterapkan dalam Sistem Instrumentasi dan Kendali (SIK) yang berfungsi untuk mengunci agar batang kendali tidak bergerak.

Jika hanya salah satu tombol UP saja yang ditekan maka batang kendali tidak akan naik. Untuk menaikkan batang kendali pengaman (*Safe*) maka disamping menekan tombol UP untuk pengaman juga tombol RELEASE harus ditekan. Demikian juga untuk kedua batang kendali lainnya.

Ketika dua tombol UP (misalnya pengaman dan kompensasi) ditekan secara bersamaan maka tidak ada batang kendali yang naik, walaupun tombol RELEASE ditekan.

Untuk menurunkan batang kendali dapat dilakukan bersamaan bahkan untuk ketiga batang kendali tersebut. Hal ini dilakukan jika akan dilakukan *shut down* secara normal.

Setelah dilakukan pengujian sistem *interlock* keyboard, operasi Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem *interlock* telah berfungsi seperti pada SIK reaktor Kartini.

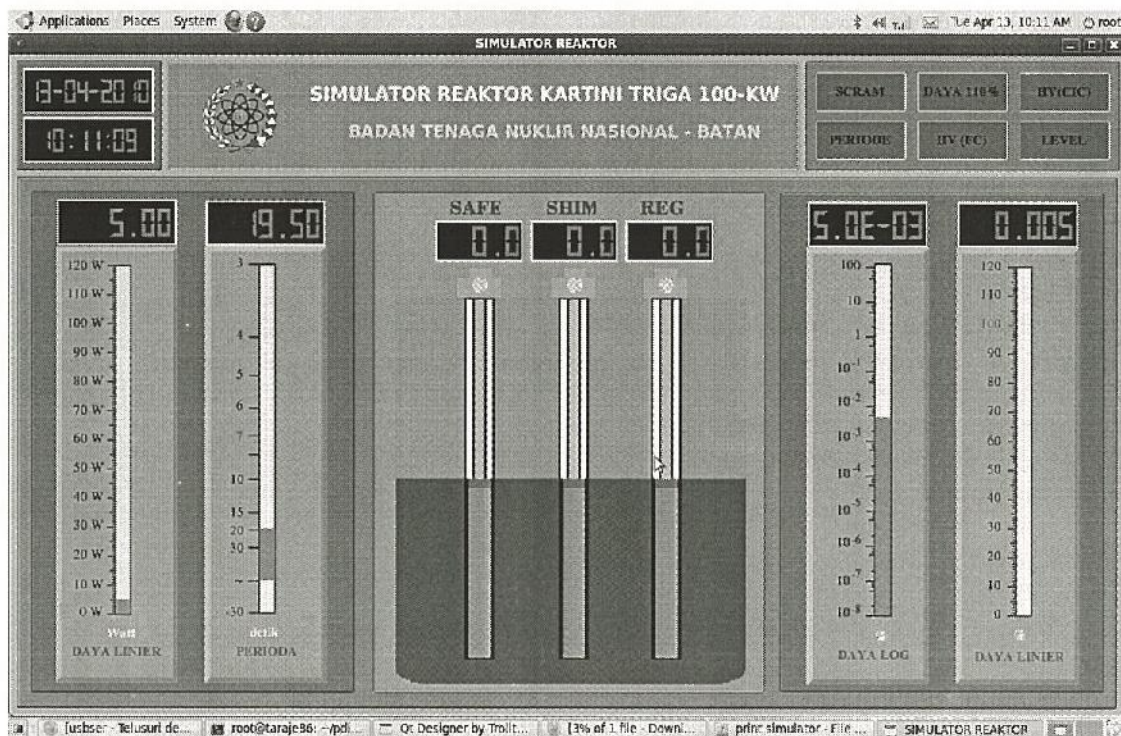
Sistem Informasi Proses

Sistem Informasi Proses pada Simulator Reaktor seperti yang dipaparkan pada Gambar 4 menampilkan parameter proses dalam bentuk numeris dan *bargraph*.

Parameter yang ditampilkan antara lain :

1. Posisi batang kendali dari 0% sampai 100% untuk batang Pengaman (SAFE), batang Kompensasi (SHIM) dan batang

- Pengatur (REG) dengan ketelitian satu angka dibelakang koma (0,1%)
2. Daya linier dengan skala linier dari 0 sampai 120 Watt. Pada daya > 120 Watt skala berubah menjadi 0 kW sampai 120 kW. Pada daya <100 kW tampilan bargraph berwarna hijau. Pada daya >100 kW tampilan *bargraph* berubah warna kuning, dan pada > 110 kW tampilan *bargraph* berubah warna menjadi merah.
 3. Persen daya logaritmik, dengan skala logaritmik dari 10^{-8} % sampai 100 %. Pada daya $\leq 100\%$ *bargraph* berwarna hijau, apabila daya > 100% akan berubah warna kuning dan pada daya >110% berubah menjadi warna merah.
 4. Periode reaktor dengan skala dari -30 ; ~ ; 30 sampai 3 detik. Untuk perioda ≥ 9 detik *bargraph* berwarna hijau. Jika perioda <9 detik *bargraph* berubah warna kuning, dan bila periode reaktor <7 detik tampilan *bargraph* berubah warna menjadi merah
 5. Persen daya linier, dengan skala dari 0 % sampai 120 %. Pada daya $\leq 100\%$ *bargraph* berwarna hijau, apabila daya > 100% akan berubah warna kuning dan pada daya >110% berubah menjadi warna merah



Gambar 4. Tampilan Sistem Informasi Proses

Ada tampilan lain berupa indikator *scram*, periode, daya 110% dan lain-lain

Jika terjadi *scram* periode maka indikator PERIODE akan menyala dengan warna merah. *Scram* adalah terlepasnya ketiga batang kendali dari pemegangnya dan jatuh kembali ke tempat semula. Setelah batang kendali jatuh maka pemegang batang kendali akan turun untuk kembali memegangnya. Jika ketiga batang kendali telah tertangkap oleh pemegangnya maka indikator *SCRAM* dan

PERIODE akan kembali padam / mati. *Scram* periode terjadi karena kenaikan batang kendali terlalu cepat sehingga menghasilkan periode reaktor < 7 detik.

Jika kenaikan batang kendali dilakukan perlahan-lahan sehingga periode reaktor masih > 7 detik, tetapi daya reaktor mencapai >110 kW maka akan terjadi *Scram* karena daya yang dihasilkan melebihi 110%. Pada kondisi ini indikator 110% akan menyala. setelah pemegang batang kendali turun dan kembali

memegangnya maka indikator akan kembali padam / mati.

Telah dilakukan percobaan dengan menaikkan hanya satu batang kendali saja dengan hasil seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Daya yang dihasilkan saat batang kendali dinaikkan.

Batang Kendali	% kenaikan	Daya dihasilkan
Pengaman saja	100	11,84 W
Kompensasi saja	100	11,84 W
Pengatur saja	100	6,37 W

Untuk mengoperasikan simulator reaktor agar dicapai kondisi kritis pada daya tertentu maka posisi batang kendali Pengaman dinaikkan terlebih dahulu hingga mencapai 100%. Selanjutnya batang Kompensasi dinaikkan secara perlahan sampai 51%. Dalam menaikkan batang Kompensasi harus selalu memperhatikan meter Periode. Jangan sampai periode mencapai angka 7.

Langkah terakhir adalah menaikkan batang Pengatur sampai menghasilkan daya sesuai yang diinginkan. Dalam menaikkan batang Pengatur harus lebih hati-hati dan perlahan-lahan, sambil memperhatikan meter Periode dan meter daya.

Pernah dilakukan pengaturan daya simulator reaktor Kartini sampai kritis pada 100 kW, dengan konfigurasi : Pengaman = 100%; Kompensasi = 51% dan Pengatur = 52%.

KESIMPULAN

Hasil pengujian melalui percobaan menunjukkan bahwa sistem *interlock* sudah

sesuai dengan SIK reaktor Kartini, dengan keterbatasan seperti tersebut dalam pendahuluan. Tampilan informasi proses, telah mendekati kondisi Sistem Informasi Proses pada Sistem Instrumentasi dan Kendali (SIK) reaktor.

Dari hasil pengujian bahwa simulator reaktor Kartini dapat menunjukkan daya > 100kW ; dapat menghasilkan perioda <7 detik dan bisa terjadi *scram*

Untuk mengoperasikan simulator reaktor Kartini harus dilakukan secara hati-hati serta dapat disimpulkan bahwa simulator reaktor tersebut dapat digunakan sebagai peragaan operasional reaktor dan juga untuk pelatihan operator reaktor penelitian model TRIGA MARK II yang menggunakan 3 buah batang kendali.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim, "Prinsip Reaktor Nuklir",Diklat National Basic Profesional Training Course on Nuclear Safety", PUSDIKLAT-BATAN, (2008)
2. Anonim, "Teknik Pengendalian Daya Reaktor", Pelatihan Instrumentasi dan Kendali Reaktor, PUSDIKLAT-BATAN, (2005)
3. Anonim, "Praktikum Pengenalan Operasi Reaktor", Pelatihan Instrumentasi dan Kendali Reaktor, PUSDIKLAT-BATAN, (2005)
4. Niger Barbara, "Sistem Operasi Reaktor Kartini", AKAKOM, (2001)
5. Prajitno, "Pembuatan Sistem Informasi Proses untuk Reaktor", Laporan Teknis, PTAPB, (2008)
6. BATAN, "Petunjuk Operasional Operasi Reaktor", (2009)