

## **PENGATURAN POSISI *CONTROL RODS* UNTUK MELANJUTKAN OPERASI HTGR PASCA *SCRAM* DENGAN SIMULATOR PCTRAN-HTR**

**M. Khoirul Anam<sup>1</sup>, Dwi Priyantoro<sup>2</sup>, Syarip<sup>3</sup>**

1) Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir, Yogyakarta, Indonesia, mkhoirulanam@gmail.com

2) Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir, Yogyakarta, Indonesia

3) Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, Yogyakarta, Indonesia

### **ABSTRAK**

**PENGATURAN POSISI *CONTROL RODS* UNTUK MELANJUTKAN OPERASI HTGR PASCA *SCRAM* DENGAN SIMULATOR PCTRAN-HTR.** Reaktivitas pada reaktor HTGR diatur dengan batang kendali (CR) yang terdiri dari 16 pasang yang terbagi menjadi dua bagian, yaitu 7 pasang di tengah teras reaktor dan 9 pasang di bagian tepi moderator. Ketika kondisi abnormal terjadi CR secara otomatis akan jatuh tersisip ke dalam teras reaktor sehingga reaktor *SCRAM* dan berada pada kondisi subkritis. Untuk melanjutkan operasi reaktor pasca *SCRAM* diperlukan analisis terkait pengaruh reaktivitas negatif dari Xenon dan suhu. Pada penelitian ini telah berhasil dilakukan simulasi penentuan posisi CR yang optimal menggunakan PCTRAN-HTR untuk melanjutkan operasi reaktor dalam dua tingkat daya, yaitu daya rendah (RDE) dengan daya 10 MWth dan daya tinggi 200 MWth. Kedua tingkat daya tersebut dicapai dengan menarik CR ke posisi tertentu sampai kondisinya kritis lagi. Hasil yang telah diperoleh menunjukkan bahwa dengan posisi CR 52 % naik sudah bisa menghasilkan kondisi superkritis untuk daya RDE dan dengan posisi 57 % dan 58 % naik, untuk daya tinggi sehingga status operasi dari *start* (S) bisa diganti *power* (P).

Kata kunci: Batang Kendali, HTGR, Reaktivitas, *SCRAM*

### **ABSTRACT**

**ADJUSTMENT OF CONTROL RODS POSITION TO CONTINUE HTGR OPERATION AFTER REACTOR *SCRAM* BY USING PCTRAN-HTR SIMULATOR.** HTGR have 16 pairs of control rods (CRs) which are 7 pairs located in the central region and 9 pairs located in the outer area of moderator. This CRs are used to control reactivity of the reactor core, and if the abnormal condition is occurred, these control rods automatically dropped to the core or reactor scram and reactor in subcritical condition. To continue reactor operation, the CRs should be withdrawal to achieve reactor in critical condition but before this action, the analysis of negative reactivity effects of Xenon and fuel temperature should be done. The simulation to determine the optimum CRs positions in achieving reactor critical in two reactor power levels operation of 10 MWt (RDE) and 200 MWt has been successfully done by using PCTRAN-HTR simulator. Both power levels conditions are reached by withdrawal the CRs in the certain position. The simulation results show that 52 % up of CRs in RDE can achieve a critical condition while for 200 MWth the critical condition is achieved by 57 % and 58 % up, and the status operation can change from *start* (S) to *power* (P).

Keyword: HTGR, Control Rods, Reactivity, *SCRAM*

## PENDAHULUAN

*High Temperature Engineering Test Reactor* (HTTR) di Jepang yang berdaya 30 MWth<sup>1</sup> dan HTR-10 China dengan daya 10 MWth<sup>2</sup> telah dibuat dengan penelitian dan pengembangannya bertujuan untuk membangun *High Temperature Gas-Cooled Reactor* (HTGR) dan juga untuk kegunaan pemanfaatan panas nuklir lainnya<sup>3</sup>. Seperti halnya yang sedang diupayakan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) untuk membangun Reaktor Daya Eksperimental (RDE) dengan daya 10 MWth yang sejenis dengan reaktor HTR-10 untuk keperluan produksi listrik, pembuatan hidrogen untuk produksi pupuk dan lain sebagainya. (Nakagawa, 1992) Blok bahan bakar HTGR secara umum terdiri dari batang bahan bakar yang terdiri dari susunan partikel bahan bakar dengan kernel UO<sub>2</sub> yang disusun dalam matrik dan terkompaksi menjadi bahan bakar (*fuel compact*) di dalam moderator graphit.

HTGR adalah reaktor inovatif dengan karakteristik yang menguntungkan dari sisi efek umpan balik reaktifitas negatif (*negative reactivity feedback effect*) yang membuat reaktor tetap stabil ketika terjadi penarikan batang kendali (CR) secara tak wajar maupun karena kejadian mengancam lainnya<sup>4</sup>.

Selain itu, HTGR juga memiliki keunggulan dari beberapa sisi lainnya seperti sisi ekonomi, keselamatan, infrastruktur, *proliferation resistance* dan proteksi fisik, lingkungan dan limbah serta memiliki keselamatan bawaan (*inherent safety*). Keselamatan bawaan tersebut bisa berupa kapasitas panas teras reaktor yang besar sehingga memiliki kemampuan tinggi untuk mengumpulkan panas dan efek umpan balik reaktifitas negatif artinya kemampuan mengurangi reaksi fisi nuklir secara segera ketika terjadi peningkatan suhu teras reaktor yang berlebihan<sup>5</sup>.

Pada pengoperasian HTGR, kestabilan daya bisa dicapai dengan mengatur reaktivitas teras menggunakan CR (Tachibana, 2004). Pengaturan CR membuat teras reaktor menghasilkan suhu keluaran yang sesuai atau stabil sehingga tingkatan daya juga stabil. CR tersebut dimasukkan (*inserted*) ke blok bahan bakar atau ditarik

(*withdrawl*) dari blok bahan bakar sesuai dengan tingkat kestabilan suhu maupun daya yang ditentukan.

CR dimasukkan diantaranya karena keadaan darurat (*SCRAM*). Sistem *SCRAM* ini mengandalkan gravitasi sebagai pendorongnya, setelah terjadi hal-hal yang mengancam keselamatan reaktor diantaranya adalah panas berlebihan, daya listrik sistem keamanan itu sendiri tidak stabil atau terjadi kehilangan pasokan daya listrik sebagaimana yang telah disimulasikan JAEA. Mereka melakukannya dengan cara manual *shutdown* sebagai simulasi kehilangan pasokan daya listrik (*loss of off-site electrical power*) dari salah satu kejadian operasi yang diantisipasi (*anticipated operational occurrences, AOO*)<sup>6</sup>.

Hal tersebut tentunya juga harus menjadi perhatian dalam pengembangan RDE di Indonesia mengingat di negara ini juga sering terjadi pemadaman daya listrik baik dalam waktu singkat maupun lama.

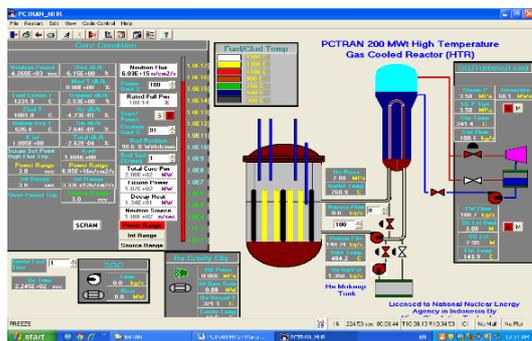
Berdasarkan atas penjelasan tersebut, diasumsikan bahwa kehilangan daya listrik terjadi pada sistem CR hanya sementara saja yang mengakibatkan reaktor *SCRAM*. Kemudian dinyatakan bahwa masalah sudah diatasi dan semua kondisi aman sehingga operasi perlu dilanjutkan. Oleh karena itu pengoptimalan dalam melanjutkan operasi reaktor perlu dilakukan pada kondisi setelah terjadi *SCRAM* dengan cara mengatur CR, yaitu penarikan harus dilakukan sesuai dengan karakteristik HTGR itu sendiri yang memiliki kapasitas panas teras reaktor yang besar dan di sisi lain juga memiliki efek umpan balik reaktivitas negatif hingga dicapai daya minimal 30 % sehingga status operasi dari *start* (S) menjadi *power* (P) yang mana dengan daya 30 % mampu menggerakkan turbin pembangkit listrik.

Selanjutnya dengan penelitian ini, maka harapannya adalah bisa dijadikan acuan untuk pengoperasian reaktor jenis HTGR setelah *SCRAM* dan ketika kondisi setelah *SCRAM* bisa didapatkan kembali daya minimal reaktor berdasarkan panas dari keluaran sistem pendingin oleh penarikan CR dengan memperhatikan efek umpan balik reaktivitas teras.

## LANDASAN TEORI

### PCTRAN-HTR

PCTRAN-HTR adalah perangkat lunak untuk komputer yang dibuat oleh Micro-Simulation Technology dengan tujuan mensimulasikan reaktor temperatur tinggi (*High Temperature Reactor*). Reaktor yang disimulasikan pada intinya adalah reaktor HTGR yang merupakan reaktor bersuhu tinggi ketika dioperasikan yang didinginkan oleh gas helium. Berikut tampilan PCTTRAN yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tampilan PCTTRAN-HTR

PCTRAN-HTR ini memiliki kendali grafik yang menarik pada simulasinya yang menggunakan model sementara kinetika reaktor dan thermal-hidrolik yang sederhana. Pada awal pembuatan simulasi reaktor terbatas hanya pada reaktor berpendingin air.

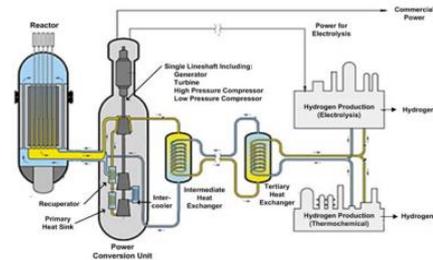
Kemudian *Micro-Simulator Technology* mengembangkan sebuah simulasi PC-DOS dari reaktor jenis 30MW High Temperature Test Reactor (HTTR) untuk Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI or the current Japan Atomic Energy Agency JAEA) di Oarai tahun 1998 dan yang sekarang yang pertama kalinya dibuat dengan dasar aplikasi Windows<sup>7</sup>.

Modul dari prototipe HTR ini membangkitkan 200 MWth dengan suhu keluaran pendingin reaktor 800 °C, tekanan sekitar 7 Mpa dengan aliran helium ke teras digerakkan oleh alat sirkulasi dan pengaturan kecepatannya bisa dari 30%-100%.

### HTGR

HTGR merupakan reaktor daya generasi IV yang dikembangkan dengan moderator graphit<sup>8</sup>, berbahan bakar

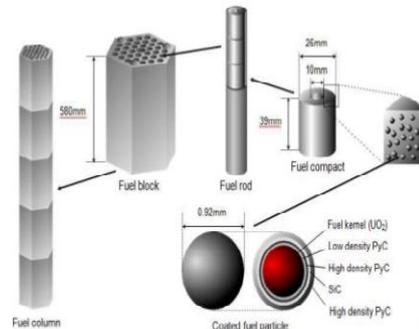
berbentuk segienam (*prismatic fuel block*) dan reaktor berpendingin gas helium dalam kenyataannya sekarang sudah ada dua macam, yaitu HTTR di Jepang yang berdaya 30 MWth dan HTR-10 di China dengan daya 10 MWth yang sama dengan RDE yang akan di bangun di Indonesia. Skema reaktor HTGR ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Skema reaktor HTGR<sup>9</sup>.

### Bahan Bakar

HTGR didesain dengan menggunakan bahan bakar keramik yang di suport oleh *inherent safety* dari HTGR. Bentuk bahan bakarnya disebut dengan TRISO<sup>10</sup>. Bahan bakar tristructural-isotropic (TRISO) adalah jenis partikel bahan bakar mikro. TRISO terdiri dari kernel bahan bakar terbentuk dari UOX (*Uranium Oxide*) di tengah-tengahnya<sup>11</sup>. Bahan bakar TRISO dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Bahan bakar pada teras HTGR prismatic<sup>10</sup>.

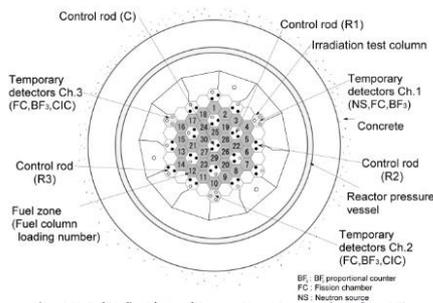
Lalu lapisan yang terdiri dari empat layer dari tiga material isotropik. Keempat lapisan adalah lapisan berpori penyangga yang terbuat dari karbon, diikuti oleh lapisan dalam padat karbon pirolitik (PyC), diikuti oleh lapisan keramik SiC untuk mempertahankan produk fisi pada temperatur tinggi<sup>10</sup>.

## Reaktivitas

Perubahan pada reaktivitas yang bisa bernilai positif maupun negatif adalah karena beberapa kejadian tidak sengaja maupun karena kesengajaan<sup>14</sup>. Diantara kejadian-kejadian tersebut adalah penarikan CR, osilasi Xenon, pergerakan CR karena kesalahan pengukuran daya atau kesalahan operator, naik dan turunnya suhu penghilang panas primer secara tiba-tiba, pemadatan teras *pebble bed* karena gempa bumi, patahnya saluran pemindah panas pada *steam generator* atau penukar panas yang mengakibatkan air atau uap masuk ke dalam teras (densitas uap yang meningkat menyebabkan kesalahan nilai CR), jatuhnya CR, kesalahan pemuatan bahan bakar, dan loncatnya CR keluar teras<sup>10</sup>.

## Batang Kendali (CR)

Terdapat 16 pasang CR dalam teras HTTR dengan 7 pasang di tengah-tengah bahan bakar dan 9 pasang lainnya di bagian *reflector*<sup>12</sup> dengan skema yang ditunjukkan oleh Gambar 4 di bawah ini.

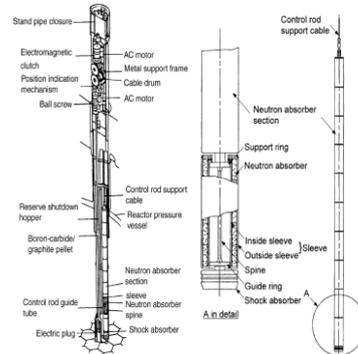


Gambar 4. Skema CR di teras reaktor<sup>10</sup>.

CR seperti pada Gambar 5 bisa mencapai kondisi subkritis dari semua kondisi operasi dan menjaga kondisi subkritis bahkan ketika ada sepasang CR yang macet dalam pengoperasiannya. Lalu ketika *SCRAM* pada kondisi operasi normal, CR pada bagian reflektor masuk ke dalam teras karena dilepaskan dari sistem penggerak dan sisanya dilepaskan ke teras setelah reaktor dingin dengan maksud agar CR tidak retak karena berada pada kondisi dengan suhu outlet 950 °C<sup>8</sup>. Skema CR ketiak *SCRAM* bisa dilihat pada Gambar 6.

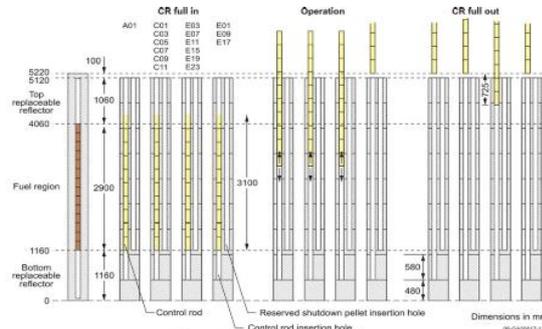
Selama operasi normal, posisi CR diatur dengan torsi motor dengan kecepatan

maksimal adalah 70 mm/s. Ketika arus listrik melalui kopling elektromagnet, maka terjadilah sinyal *SCRAM* dan terpisahkan antar kopling (*electromagnetic clutch*) dengan CR<sup>10</sup>.



Gambar 5. CR pada HTTR<sup>10</sup>.

Untuk melindungi kabel pendukung CR dari beban penuh, rem pembatas kecepatan menjaga kecepatan CR tetap selama reaktor *SCRAM* dengan menggunakan pengatur torsi pada kecepatan tertentu. Mekanisme peredam benturan (*shock absorber*) mengurangi kecepatan CR pada posisi terbawah dengan gas<sup>10</sup>.



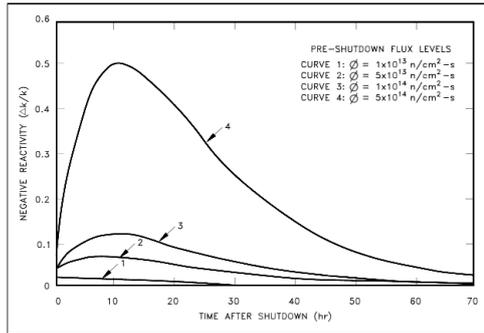
Gambar 6. Posisi CR<sup>10</sup>.

## Xenon

Xenon adalah produk fisi yang menyerap neutron dan memiliki reaktivitas negatif atau biasa disebut *Xenon Poisoning* yang muncul kapan saja ketika reaktor sedang dalam operasi tingkat daya dengan waktu paro sekitar 11 jam. Pada kejadiannya, Xenon berasal dari dua sumber, yaitu dari produk fisi peluruhan dari Te-135 yang meluruh menjadi I-135 menjadi Xe-135 (Xenon) dan yang kedua adalah langsung dihasilkan dari proses fisi nuklir yang terjadi

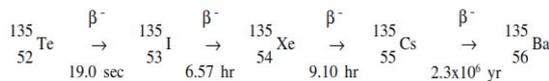
dan setelah 40 jam akan mencapai titik keseimbangan (*equilibrium value*)<sup>13</sup>.

Titik keseimbangan ini dicapai ketika jumlah Xenon yang dihasilkan dan yang terbakar setara. Kemudian semakin tinggi tingkat dayanya, semakin tinggi juga titik keseimbangan Xenonnya, namun hal ini tidak selalu sebanding dengan tingkatan dayanya<sup>13</sup>. Sementara itu untuk kondisi Xenon setelah reaktor *shutdown* bisa dilihat pada Gambar 7 berikut ini.



Gambar. Perubahan Xenon setelah reaktor *shutdown*<sup>13</sup>.

Ketika mengoperasikan reaktor, xenon merupakan salah satu hal yang dipertimbangkan karena memiliki sifat menyerap neutron dengan tampang lintang serap neutron yang mencapai  $2,65 \times 10^6$  barn. Adapun proses produk fisi menjadi Xenon hingga stabil bisa dilihat pada proses berikut ini<sup>13</sup>.

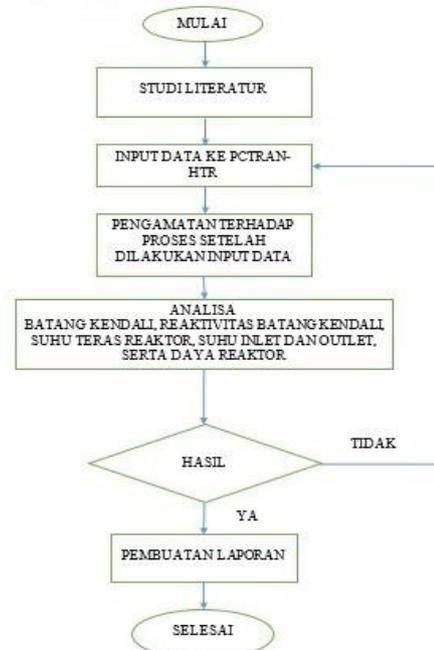


## METODE PENELITIAN



Gambar 7. Input data

Pada simulasi penarikan CR ini digunakan simulator PCTTRAN-HTR 200 MWth dengan variasi daya 85 % daya RDE, 70 %, 85 % dan 100 % daya tinggi sebelum *SCRAM* terjadi. Pelaksanaan penelitian bisa dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8 di bawah ini.



Gambar 8. Diagram alir penelitian.

Pada penelitian ini dilakukan pengoperasian reaktor dengan asumsi reaktor sudah dalam kondisi daya konstan (status *POWER*) dan semua kondisi normal kemudian terjadi *SCRAM* karena pasokan daya listrik ke sistem CR terputus beberapa saat sehingga CR jatuh. Untuk melanjutkan lagi perlu memperhatikan reaktivitas yang negatif terutama oleh reaktivitas Xe-135 yang memiliki umur 11,5 jam. Setelah *SCRAM*, maka status operasi reaktor adalah *start* (S) dan dilakukan penarikan CR pada posisi tertentu dengan kecepatan 6 mm/s hingga teras menghasilkan fluks neutron yang cukup untuk menghasilkan daya dengan persentase 30%. Kemudian status operasi reaktor diganti *power* (P) dan terus dinaikkan hingga posisi yang dirasa daya menjadi *steady state* dengan total nilai reaktivitas reaktor positif dan reaktivitas Xe-135 juga konstan (dalam grafik menjadi datar). Tahapan-tahapan skenario penelitian ini bisa dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Skenario Penelitian

1	2	3	4	5	6
Daya (%)	Daya (%)	Reaktivitas	Penarikan CR	Perubahan Status	Daya (%)
100	S				
85	C				
70	R	< 2 %		Dari <i>START</i> diubah ke <i>POWER</i> bila daya sudah 30%	Minimal dan stabil
85	A	Sangat negatif	Posisi?		
(RDE)	M				

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada penelitian HTGR menggunakan simulator PCTTRAN-HTR, daya dan waktu operasi sebelum *SCRAM* divariasikan dari 85 % (RDE), 70 %, 85 % dan 100 % dengan waktu variasi 50 detik, 10 ribu detik, dan 20 ribu detik. Maksud dari 85 % (daya RDE) adalah selain melihat kondisi daya pada bagian sangat rendah dan juga sebagai penelitian pengembangan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) 10 MWth di Indonesia. Adapun variasi daya dan waktu ini diharapkan bisa memberikan keakuratan dari penelitian ini yang berkaitan dengan penarikan batang kendali (CR) setelah *SCRAM* dengan memperhatikan reaktivitas-reaktivitas yang ada, khususnya Xenon, suhu dan CR.

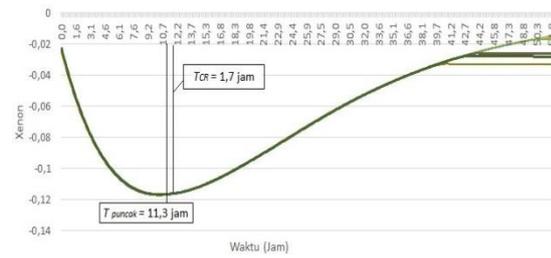
Reaktivitas Xenon sangat terpengaruh oleh daya pada reaktor sebelum terjadinya *SCRAM* dan pada penelitian ini diasumsikan bahwa kesetimbangan Xenon pada setiap variasi daya sebelum *SCRAM* adalah sama namun memiliki pengaruh dalam kelanjutan operasi reaktor setelah *SCRAM* dengan reaktivitasnya semakin negative bila daya sebelum *SCRAM* semakin tinggi.

**Daya RDE**

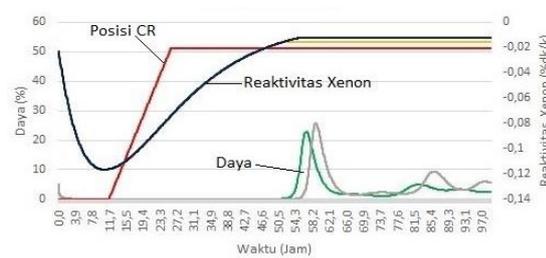
Nilai puncak Xenon hasil penelitian ini sesuai Gambar 8 adalah 1,17% dk/k akibat *SCRAM* dari 85% daya RDE (untuk pengujian daya RDE). Selanjutnya untuk penarikan CR, kondisi Xenon harus turun terlebih dahulu ke posisi 1,16% dk/k yang dicapai dengan waktu 11,7 jam dengan posisi CR 51%, 52%, 53% dan 54%.

Daya reaktor yang bisa dihasilkan dari proses penarikan CR setelah *SCRAM* pada reaktor HTGR dengan simulator PCTTRAN-HTR terutama yang menghasilkan daya di atas 30% untuk daya RDE adalah CR dengan

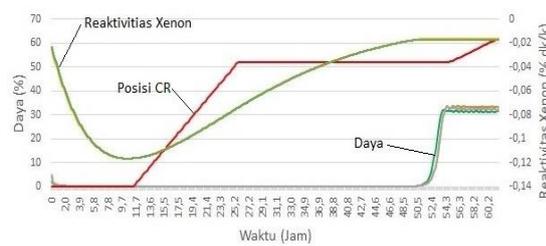
posisi mulai 52% seperti yang terlihat pada Gambar 10. Adapun untuk posisi 51% seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 9 belum mampu mencapai daya lebih dari 30%.



Gambar 8. Perubahan Xenon akibat *SCRAM* dari daya RDE

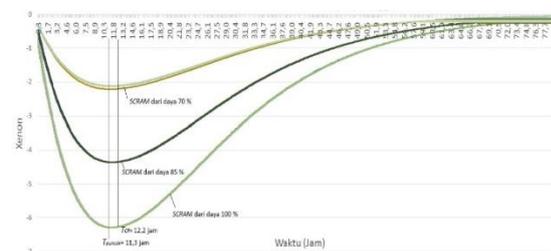


Gambar 9. Kenaikan daya dengan posisi CR 51%



Gambar 10. Kenaikan daya dengan posisi CR 52%

**Daya Tinggi**



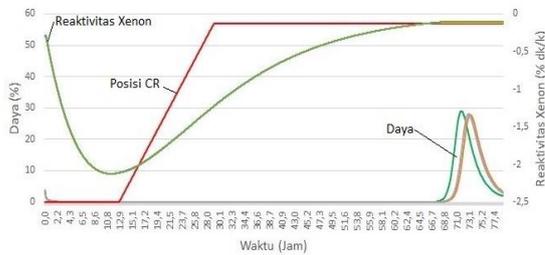
Gambar 11. Perubahan Xenon akibat *SCRAM* dari tinggi

Pada simulasi dengan daya tinggi nilai Xenonnya adalah 2,12% dk/d ketika *SCRAM* dari daya 70%, 4,35% dk/d pada daya 85% dan 6, 28% dk/d pada daya 100% yang ditunjukkan oleh Gambar 1. Setelah kembali menurun jumlahnya, yaitu pada nilai 2,11%

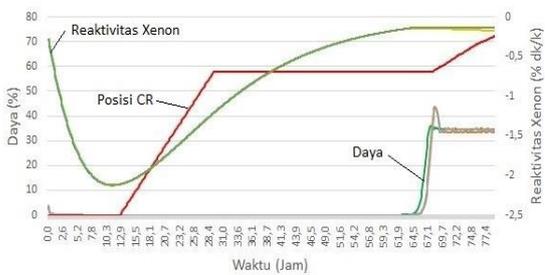
dk/k, 4, 34 % dk/k dan 6,27 % dk/k (12,2 jam setelah SCRAM), CR ditarik menuju posisi tertentu divariasikan dari 55 %, 57 %, 58 %, 59 %, 60 % dan 61 %.

**SCRAM dari daya 70 %**

Daya reaktor yang bisa dihasilkan dari proses penarikan CR setelah SCRAM dari daya 70 % pada reaktor HTGR dengan simulator PCTAN-HTR terutama yang menghasilkan daya di atas 30 % untuk daya tinggi adalah CR dengan posisi mulai 57 % dan 58 %. Adapun untuk posisi 57 % seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 12 belum mampu mencapai daya lebih dari 30 % dan baru bisa dicapai dengan posisi CR 58 % seperti pada Gambar 13.



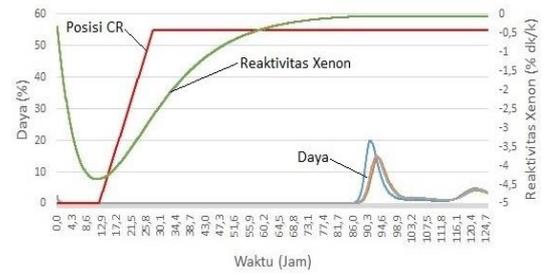
Gambar 12. Kenaikan daya dengan posisi CR 57%



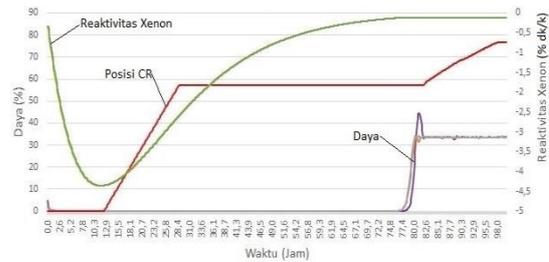
Gambar 13. Kenaikan daya dengan posisi CR 58%

**SCRAM dari daya 85%**

Setelah SCRAM dari daya 85%, posisi 55% seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 14 belum mampu mencapai daya lebih dari 30% dan baru bisa dicapai dengan posisi CR 57% sesuai Gambar 15.



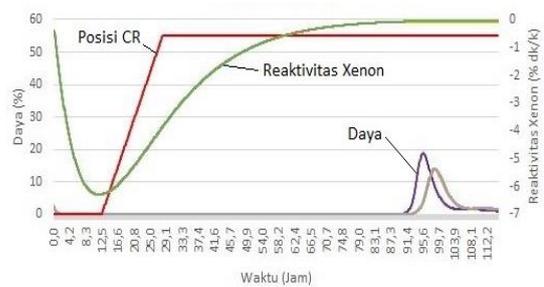
Gambar 14. Kenaikan daya dengan posisi CR 55%



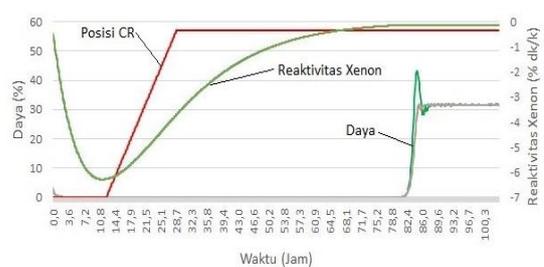
Gambar 15. Kenaikan daya dengan posisi CR 57%

**SCRAM dari daya 100 %**

Sama dengan hasil setelah SCRAM dari daya 85 %. Pada kenaikan daya yang bisa lebih dari 30 % setelah SCRAM dari daya 100 % seperti pada Gambar 17, yaitu bisa dicapai dengan posisi CR 57 %. Sedangkan untuk posisi 55 % belum mampu menghasilkan daya lebih dari 30 % seperti yang ditampilkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Kenaikan daya dengan posisi CR 55%



Gambar 17. Kenaikan daya dengan posisi CR 57%

## Suhu

Berkaitan dengan kenaikan CR dan perubahan suhu reaktor HTGR untuk daya RDE, dalam simulasi ini ternyata pada daya RDE dengan posisi CR 51 % hingga CR 54 % membuat kenaikan suhu yang masih dalam batasan-batasan operasi dengan suhu inlet maupun outlet masih dibawah 950 °C. Sedangkan untuk percobaan dengan daya tinggi. Hasil menunjukkan bahwa suhu outlet mencapai lebih dari 1000 °C, namun hal itu masih dalam batasan aman.

## KESIMPULAN

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan menggunakan PCTTRAN-HTR didapatkan posisi batang kendali yang optimal untuk percobaan daya RDE (10 MWth) adalah dengan posisi CR 52 % dan untuk daya tinggi (200 MWth) adalah dengan posisi 58 % untuk kondisi setelah SCRAM dari daya 70 % dan posisi 57 % untuk kondisi setelah SCRAM dari daya 85 % dan 100 %. Sehingga dengan posisi CR tersebut status operasi sudah bisa diubah dari *start* (S) menjadi *power* (P) dan dengan kenaikan batang kendali (CR) tersebut tidak terjadi suatu masalah seperti kenaikan suhu berlebihan sehingga menyebabkan reaktor SCRAM lagi.

## SARAN

Saran yang diberikan agar penelitian selanjutnya bisa lebih baik dari penelitian ini adalah:

1. Perlu ditambahkan variasi daya sebelum SCRAM sehingga semakin banyak data akan semakin menguatkan hasil yang diperoleh.
2. Untuk penelitian selanjutnya diharapkan melakukan penelitian mengenai batas atas posisi CR yang ditarik setelah Xenon mencapai puncaknya akibat SCRAM yang mana posisi CR masih memenuhi batasan-batasan operasi HTGR.
3. Perlu dilakukan penelitian dengan variasi waktu setelah reaktor SCRAM dan posisi CR tidak divariasikan sehingga diharapkan bisa diketahui pengaruh

reaktivitas Xenon yang semakin menurun terhadap posisi CR yang sama.

## DAFTAR PUSTAKA

- 1 Nakagawa, Sawa, Ohashi: *Safety Analysis of Abnormal Reactivity Events in HTTR*: JAERI. 1992
- 2 Chen, Dong, Zheng, Shi, Zhang: *Benchmark Calculation for the Steady-State Temperature Distribution of the HTR-10 under Full-Power Operation*. Beijing: Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University. 2008
- 3 Fujikawa, Hayashi, Nakazawa, Kawasaki, Nakagawa, Sakaba: *Achievement of Reactor-Outlet Coolant Temperature of 950°C in HTTR*. Oarai-Machi: JAERI. 2004
- 4 Tachibana, Nishihara, Sakaba, Ohashi, Sato, Ueta, Aihara, Goto, Sumita, Shibata, Takamasu, Hamamoto, Inagaki, Iyoku, Kunitomi. *Test Plan using the HTTR for Commercialization of GTHTR300C*. In: JAEA Tech 2009-063. Oarai-machi: JAEA. 2009
- 5 Tachibana, Sawahata, Iyoku, Nakazawa. *Reactivity Control System of the High Temperature Engineering Test Reactor*. Oarai-Machi: ScienceDirect. 2004
- 6 JAEA. *Confirm excellent and inherent safety characteristics of HTGR during an abnormal control rod withdrawal-News Release*: JAEA (Diakses tanggal 12 Maret 2016).
- 7 Tochio, Watanabe, Motegi, Kawano, Kameyama, Sekita, Kozo. *Operating Experience since Rise to Power Test in High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)-JAEA Technology 2007-014*. Shirakata Shirane: JAEA. 2007
- 8 Micro-Simulation Technology. *PCTTRAN HTR Simulator Software for PC*. New Jersey. 2015
- 9 Takeda, Nakagawa, Honma, Takada, Fujimoto. *Safety Shutdown of the High Temperature Engineering Test Reactor during Loss of Off-site Electric Power Simulation Test*. Oarai-Machi: Taylor & Francis. 2002.
- 10 Chapin. D, Kiffer. S, Nestell. J. *The Very High Temperature Reactor: A Technical*

- Summary*”, Alexandria: MPR Associates, Inc. 2004.
- 11 Bess. J. D, Sterbentz. J, Fujimoto. *Evaluation of the Start-Up Core Physics Tests at Japan’s High Temperature Engineering Test Reactor (Fully-Loaded Core)*. Idaho Falls: Idaho National Laboratory. 2009
  - 12 IAEA. *Evaluation of high temperature gas cooled reactor performance: Benchmark analysis related to initial testing of the HTTR and HTR-10 IAEA-TECDOC-1382*, Vienna: IAEA. 2003
  - 13 Tachibana, Sawahata, Iyoku, Nakazawa. *Test Plan using the HTTR for Commercialization of GTHTTR300C*. Ibaraki: JAEA. 2004
  - 14 DOE-HDBK-1019/2-93. *Fundamentals Handbook Nuclear Physics and Reactor Theory Volume 2 of 2*. Washington D.C.: U.S. Department of Energy. 1993
  - 15 Ball, S. J. *Overview of Modular HTGR Safety Characterization and Postulated Accident Behavior Licensing Strategy*. Oak Ridge: Oak Tidge National Laboratory. 2014

