

STUDI PERBANDINGAN ARSITEKTUR SISTEM I&C PLTN GENERASI III EPR 1600 DENGAN US-APWR 1700

Nafi Feridian*, Arief Heru Kuncoro**

*Pemda Kabupaten Banyuwangi

**Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN) - BATAN

Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710

Telp/Fax: (021)5204243 Email: ferdiansah2002@yahoo.com, ariefher@batan.go.id

Masuk: 14 April 2009

Direvisi: 22 Juli 2009

Diterima: 14 September 2009

ABSTRAK

STUDI PERBANDINGAN ARSITEKTUR SISTEM I&C PLTN GENERASI III EPR 1600 DENGAN US-APWR 1700. Dalam rangka mendukung program pemerintah di bidang penelitian dan pengembangan energi nuklir, maka dilakukan studi perbandingan arsitektur sistem instrumentasi dan kendali (Instrumentation & Control, I&C) PLTN Generasi III EPR 1600 dengan US-APWR 1700. Sistem I&C adalah salah satu sistem pendukung operasi PLTN sehingga beroperasi dengan aman dan terkendali. Studi ini membandingkan beberapa parameter struktur inti dari arsitektur sistem I&C yang terkait erat dengan persyaratan sistem keselamatan operasi pembangkit. Metodologi yang digunakan dalam melaksanakan kegiatan ini adalah studi literatur, pengumpulan data, serta melakukan kajian dan analisis. Dari studi ini diperoleh hasil yang menunjukkan bahwa antara PLTN EPR 1600 dengan PLTN US-APWR 1700 banyak memiliki kesamaan, yaitu keduanya menerapkan teknologi arsitektur I&C digital yang sudah terkomputerisasi penuh dengan tingkat keselamatan tinggi berdasarkan kode standar persyaratan desain yang bersumber dari kode standar Amerika Serikat. Beberapa perbedaan yang agak menonjol antara keduanya adalah pada pengelompokan sistem safety-related dan non safety-related, sistem kendali dan pemantauan, beberapa pendukung sistem konsep pertahanan berlapis dan beberapa pendukung sistem keselamatan I&C.

Kata kunci: PLTN, EPR 1600, US-APWR 1700, arsitektur sistem I&C.

ABSTRACT

COMPARATION STUDY ON I&C SYSTEM ARCHITECTURE OF THE THIRD GENERATION NPP BETWEEN EPR 1600 AND US-APWR 1700. In order to support government's programs on research and development of nuclear energy, so a comparative study has been conducted on I&C system architecture of the third generation Nuclear Power Plant (NPP) of EPR 1600 and US-APWR 1700. I&C system is one of supporting systems in nuclear power plant in such away that the nuclear reactor operation can be safely and controllabl. This study compares parameters on main structure of I&C system architecture related with safety system of nuclear power plant operation. The methodology of this study are literature study, data collection, review and analysis. It can be concluded although the two system have some have similarities, both of them have implemented a modern digital and komputerized I&C system architecture with high ability of safety level and suitable with American code standard. But in general, they have difference parameters, such as classification of safety-related and non safety-related group, control and monitoring system, supporting systems of defence in depth and also supporting systems of I&C safety

Keywords: NPP, EPR 1600, US-APWR 1700, I&C system architecture.

1. PENDAHULUAN

Indonesia adalah salah satu negara di dunia yang berencana akan membangun Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), oleh karena itu studi dan pengembangan PLTN terus dilakukan. PLTN memiliki sistem pendukung operasi reaktor yang sangat kompleks dan harus terkait dengan fungsi keselamatan. Potensi paparan radiasi nuklir ke pekerja, masyarakat dan lingkungan adalah faktor yang menyebabkan instalasi PLTN harus lebih teliti, hati-hati dan dengan perhitungan yang lebih matang dari pembangkit listrik konvensional.

Sistem instrumentasi dan kendali (*Instrumentation and Control, I&C*) adalah salah satu sistem yang mendukung operasi PLTN agar aman dan terkendali. Mengingat pentingnya sistem I&C dalam menjaga operasi reaktor aman, maka perlu dikaji beberapa pengembangan sistem arsitektur I&C PLTN di dunia.

Dalam makalah ini akan dikaji perbandingan sistem arsitektur I&C PLTN EPR (*Evolutionary Pressurized water Reactor*) 1600 MWe dengan PLTN US-APWR (*United States Advanced Pressurized Water Reactor*) 1700 MWe. EPR 1600 adalah PLTN teknologi maju generasi III tipe PWR (*Pressurizer Water Reactor*) empat untai kelas 1600 MWe yang diproduksi oleh perusahaan Perancis (AREVA) dan Jerman (Siemen). Desain EPR merupakan hasil pengembangan dan penelitian kerjasama antara CEA (*French Atomic Energy Commission*) dengan *German Karlsruhe Research Center*. Teknologi EPR 1600 adalah pengembangan dari PLTN N4 buatan Perancis yang berkapasitas 1475 MWe dan PLTN Konvoi buatan Jerman dengan kapasitas 1400 MWe. Pada saat ini EPR 1600 ini sedang dibangun di Olkiluoto 3 (TVO) Finlandia, dan Flamanville 3 Perancis^[1], dimana diperkirakan akan operasi secara komersial pada tahun 2012^[2]. PLTN US-APWR 1700 MWe adalah PLTN tipe PWR generasi III dengan empat buah rangkaian untai yang dikembangkan oleh perusahaan *Mitsubishi Heavy Industri* (MHI) Jepang dengan improvisasi dan pengembangan beberapa teknologi PLTN produksi MHI yang sudah beroperasi di Jepang^[3]. Saat ini US-APWR sedang dibangun di Tsuruga unit 3 dan 4 dan direncanakan akan beroperasi pada tahun 2016^[4].

Studi ini sangat terkait erat dengan kegiatan Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN) BATAN sebagai bagian pelaksanaan pengkajian dan pengembangan teknologi PLTN teknologi maju. Tujuan yang ingin dicapai dalam studi ini adalah untuk mengetahui perbandingan teknologi arsitektur I&C EPR 1600 dengan US-APWR 1700 terkait dengan fungsi keselamatannya untuk menjaga operasi reaktor aman dan terkendali. Hasil studi diharapkan bisa sebagai bahan masukan dalam rangka persiapan pembangunan PLTN yang pertama di Indonesia. Untuk mendukung studi ini dilakukan kajian beberapa literatur yang terkait dengan teknologi PLTN EPR 1600 dan US-APWR 1700. Disamping itu juga dilakukan analisis studi yang terkait dengan studi ini yaitu: Penyusunan desain kriteria PLTN PWR 1000 MWe, Penyusunan studi PLTN tipe PWR 1000, Penyusunan studi PLTN tipe PHWR, Penyusunan dokumen *Preliminary Safety Analysis Report* (PSAR), dll.

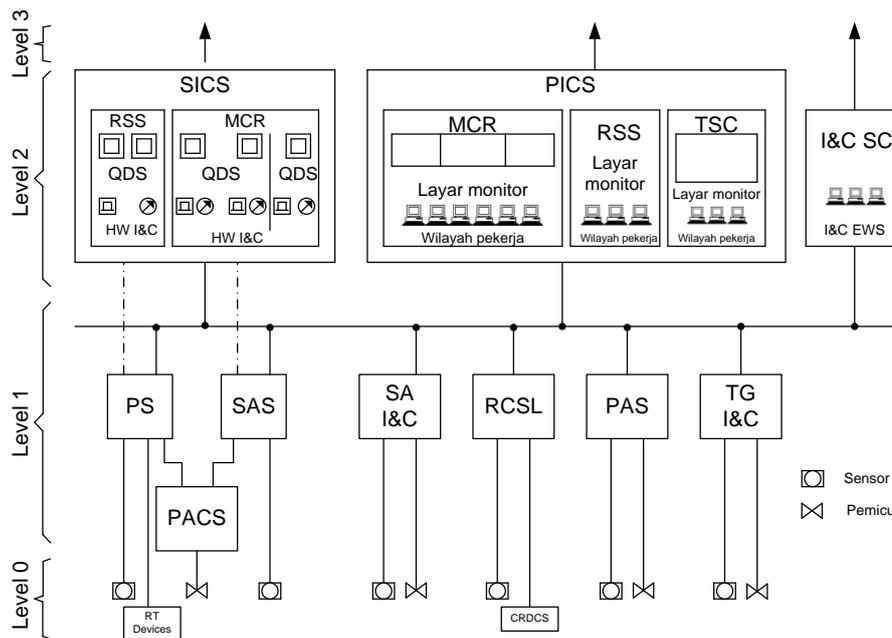
2. SISTEM ARSITEKTUR I&C EPR 1600 DAN US-APWR 1700

2.1. Sistem Arsitektur I&C EPR 1600^[5,6]

Seperti terlihat pada Gambar 1, sistem arsitektur I&C pada EPR 1600 dibagi menjadi empat *level* yang terdiri dari *level 0*, *level 1*, *level 2*, dan *level 3*.

- a. *Level 0*: Proses *interface*, merupakan proses penggabungan antara proses fisik dan sistem I&C. Pada level ini proses secara fisik dilakukan oleh sensor, peralatan pemicu, peralatan yang dipicu (seperti sensor tekanan, *thermocouples*, *switchgear*, pompa, katup), dll.

- b. *Level 1*: Sistem otomatis, pada level ini sistem I&C akan memperoleh informasi dari sensor dan melakukan fungsi secara otomatis, kemudian menampilkan proses tersebut pada layar monitor sehingga bisa dipantau oleh para pekerja. Pada level ini terdapat beberapa sistem pendukung antara lain:
- Sistem proteksi pembangkit (*protection system, PS*) berfungsi untuk melakukan *interlocks*, memproses beberapa variabel *Post Accident Monitoring (PAM)* tipe A-C yang ditampilkan di ruang kendali utama, sebagai pemicu sistem *engineered safety feature (ESF)* dan sistem *trip* reaktor.
 - Sistem keselamatan otomatis (*safety automation system, SAS*) berfungsi untuk melakukan kendali otomatis, kendali manual, *interlocks*, dan memproses beberapa variabel PAM tipe A-C yang ditampilkan di ruang kendali utama.
 - Sistem proses otomatis (*process automation system, PAS*) berfungsi untuk melakukan pengurangan risiko secara otomatis, pembatasan sistem primer secara otomatis, operasi proteksi dan kendali secara otomatis, kendali secara manual, dan menampilkan proses dan informasi sistem I&C
 - Sistem prioritas dan kendali pemicu (*priority and actuator control system, PACS*) berfungsi untuk memprioritaskan permintaan aktuasi dari *level 1* dan *level 2* sistem I&C, proteksi peralatan secara mendasar, mengendalikan peralatan pemicu dan mengendalikan sistem pemantauan.
 - Sistem kendali reaktor, pengawasan dan pembatasan (*reactor control, surveillance, and limitation, RCSL*) berfungsi untuk pembatasan reaktor secara otomatis, kendali operasi reaktor secara otomatis dan manual.
 - Sistem I&C kecelakaan berat (*severe accident I&C, SA-I&C*) berfungsi untuk melakukan fungsi pemantauan dan kendali yang dibutuhkan untuk mitigasi kecelakaan berat.
 - Sistem I&C generator uap (*turbine generator I&C, TG-I&C*) berfungsi untuk meregulasi operasi turbin generator.
- c. *Level 2*: Unit pengawasan dan pengendalian yang merupakan penghubung antara pekerja dengan sistem otomatis. Pada *level* ini terdapat beberapa sistem pendukung antara lain:
- Sistem kendali dan informasi keselamatan (*safety information and control system, SICS*) berfungsi untuk melakukan aktuasi trip reaktor secara manual yang dilakukan di ruang kendali utama dan ruang pemadaman reaktor jarak jauh (*main control room, MCR* dan *remote shutdown station, RSS*).
 - Sistem kendali dan informasi proses (*process information and control system, PICS*) berfungsi untuk melakukan dan kendali pada proses sistem sebagai pelaksanaan eksekusi yang dibutuhkan oleh operasi pembangkit termasuk juga pada situasi bahaya dan kecelakaan, PICS didukung MCR dan RSS, pada respon operasi keadaan bahaya sistem PICS didukung oleh pusat pendukung teknis (*technical support center, TSC*).
- d. *Level 3*: Sistem pengelolaan bisnis yang berisi sistem pengelolaan informasi pembangkit.



Gambar 1. Arsitektur sistem I&C EPR 1600

2.2. Sistem Arsitektur I&C US-APWR 1700^[7,8]

Pada PLTN US-APWR sistem I&C memiliki kemampuan untuk mengendalikan dan mengatur sistem pembangkit secara manual dan otomatis selama operasi normal, dalam keadaan bahaya atau dalam kondisi kecelakaan, sehingga akan menjaga operasi reaktor dalam keadaan aman. Sistem I&C pada US APWR menggunakan sistem digital, kecuali pada *diverse actuation system* (DAS) yang menggunakan sistem analog.

Arsitektur sistem I&C PLTN US APWR 1700 diperlihatkan pada Gambar 2, yaitu keseluruhan sistem I&C pada ruang kendali utama dilaksanakan oleh sistem penghubung pekerja dengan peralatan (*Human System Interface, HSI*) yang mengendalikan sistem proteksi dan pemantauan keselamatan (*Protection and Safety Monitoring System, PSMS*), sistem pemantauan dan kendali pembangkit (*Plant Control and Monitoring System, PCMS*), serta sistem pemicu beragam (*Diverse Actuation System, DAS*).

(*Human-System Interface system, HSI*) didesain untuk melakukan pemantauan pengendalian sistem kendali dan instrumentasi secara terpusat. Oleh karena itu panel kendali utama didesain untuk mempermudah operasi sehingga kesalahan operasi dan kesalahan tindakandapat diperkecil. Ada beberapa sistem pendukung HSI antara lain: *operator console*, panel layar monitor berukuran besar, *supervisor console*, *shift technical advisor console*, *diverse HSI panel*, komputer perekam proses, prosesor *logic* tanda peringatan, komputer pengelola, prosesor operasi VDU (*Visual Display Unit*), prosesor tanda peringatan pada VDU, prosesor prosedur operasi VDU, prosesor untuk mengelola tampilan layar berukuran besar, prosesor keselamatan VDU, *remote shutdown console* dan prosesor *remote shutdown console* VDU.

Sistem pemantauan dan kendali pembangkit (*Plant Control Monitoring System, PCMS*), merupakan kelompok sistem *non safety-related* yang terdiri dari beberapa sub sistem pendukung, antara lain:

- Sistem pengendali reaktor (*Reactor Control System, RCS*), berfungsi untuk menerima status sinyal dari komponen (sensor, katup kendali, katup selenoid, dll.) dan mengoperasikan sinyal secara manual dari *operator console* ke pusat PCMS.

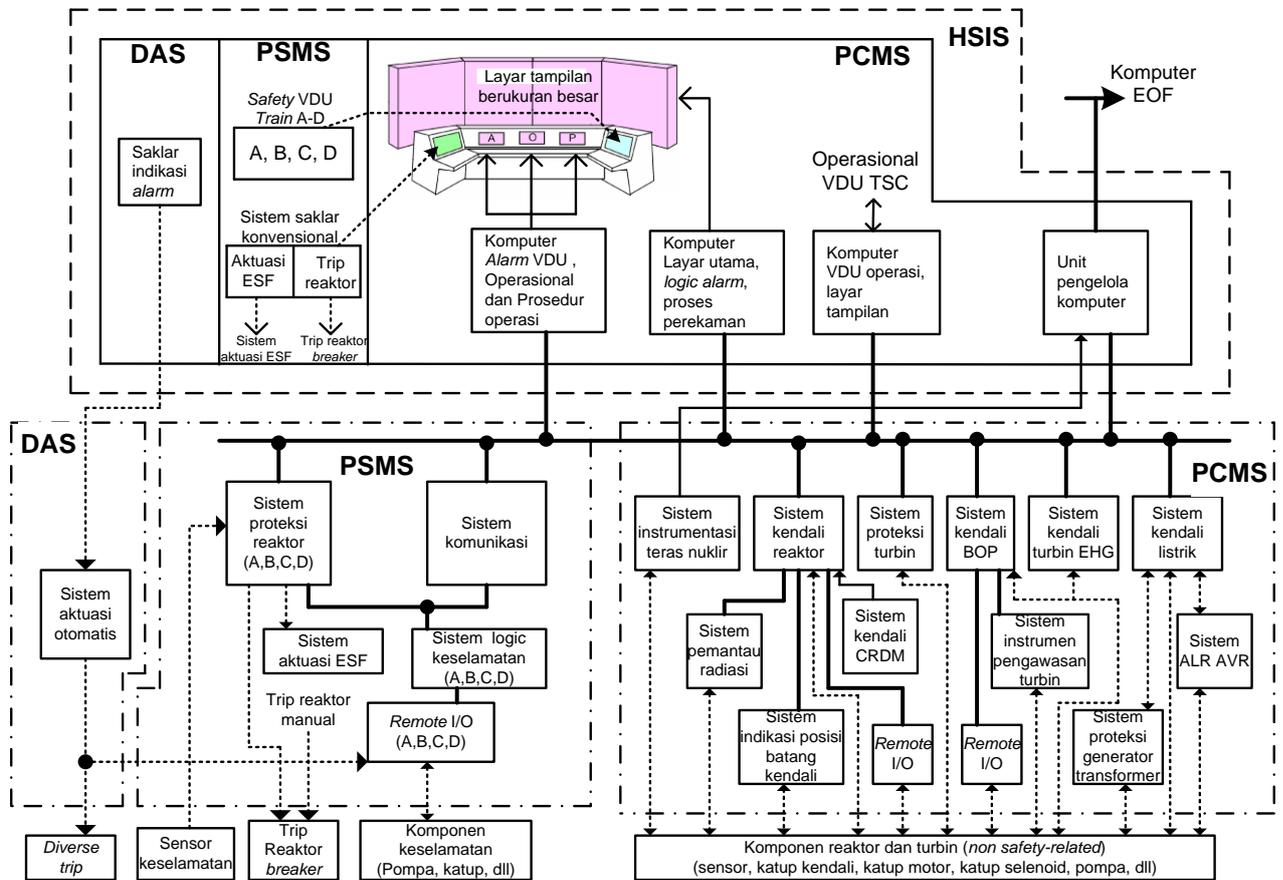
- Sistem pemantauan radiasi, berbasis mikroprosesor yang memantau proses radio-aktivitas pembangkit dan tingkat radiasi pada area tertentu.
- Sistem indikasi posisi batang kendali, adalah sistem yang berbasis mikroprosesor dan berfungsi untuk memonitor posisi batang kendali.
- Sistem CRDM (*Control Rod Drive Mechanism*), adalah sistem yang berbasis mikroprosesor yang berfungsi untuk menerima sinyal perintah pengendalian kecepatan dan arah batang kendali dari RCS.
- Sistem instrumentasi *in-core neutron*, adalah sistem berbasis mikroprosesor untuk pemantauan sinyal detektor *in-core* melalui akuisisi data jarak jauh.
- Sistem proteksi turbin, berfungsi untuk menghentikan operasi turbin jika terjadi keadaan tidak normal.
- Sistem pengendali turbin, terdiri dari beberapa mikroprosesor dan kabel *logic* yang disusun secara redundan yang berfungsi untuk melakukan proses pengawasan.
- Sistem pengendali turbin generator, berfungsi untuk mengendalikan dan memonitor turbin generator secara otomatis ataupun manual.
- Sistem instrumentasi pengawasan turbin, berfungsi untuk memantau beberapa parameter penting pada turbin seperti getaran turbin, posisi rotor, dll.
- Sistem *logic* pada sistem kelistrikan, berfungsi untuk mengendalikan dan memantau sistem kelistrikan, komponen, dll.
- Sistem proteksi generator dan transformator, berfungsi untuk menghentikan operasi generator yang diakibatkan oleh sinyal trip turbin.
- Sistem AVR/ALR (*Auto Voltage Regulator, Automatic Load Regulator*), berfungsi untuk mengatur tegangan generator.
- *Console* pengendali peralatan bantu, berfungsi sebagai penghubung peralatan bantu yang tidak dikendalikan oleh MCR.
- Sistem pengendali peralatan bantu, berfungsi untuk mengendalikan dan memantau sistem bantu (seperti sistem penyimpanan limbah, penangan limbah, dll.).

Sistem pemantauan keselamatan dan proteksi (*Protection and Safety Monitoring System, PSMS*) berfungsi untuk melaksanakan inisiasi fungsi keselamatan secara otomatis, terdiri dari beberapa sistem pendukung, antara lain :

- Sistem proteksi reaktor (*Reactor Protection System, RPS*), memiliki konfigurasi 4 *train* yang disusun secara redundan dengan masing-masing *train* berlokasi pada ruangan peralatan I&C yang terpisah. Sistem proteksi reaktor ini berfungsi untuk memicu sinyal trip reaktor dan memicu sinyal ESF.
- Sistem pemacu ESF (*Engineered Safety Feature*) terdiri dari empat *train* yang disusun secara redundan dengan masing-masing *train* diletakkan pada ruangan peralatan I&C yang berbeda.
- Sistem *logic* keselamatan berfungsi untuk menerima sinyal permintaan sistem *level* picu secara otomatis dari ESF. Sistem *logic* keselamatan juga menerima sinyal kendali *level* komponen secara manual dari *operator console* terdiri dari empat *train* yang disusun secara redundan, masing-masing *train* diletakkan pada ruangan peralatan I&C yang terpisah.
- Sistem komunikasi, terdiri dari unit *bus* pembangkit secara keseluruhan, jalur *bus* keselamatan dan jaringan perawatan untuk masing-masing *train* pada PSMS dan PCMS.

Sistem aktuasi beragam (*Diverse Actuation System, DAS*), didesain berdasarkan persyaratan US-NRC, DAS diklasifikasikan sebagai sistem *non safety-related* sehingga kriteria kesalahan tunggal tidak diterapkan pada sistem ini. DAS terdiri dari beberapa variasi komponen sehingga akan terhindar dari mode kesalahan bersama (*Common Mode Failure*,

CMF). DAS juga mengaktualisasi fungsi keselamatan secara mandiri baik secara manual maupun secara otomatis.



Gambar 2. Arsitektur sistem I&C US-APWR 1700.

3. PEMBAHASAN

Ada beberapa parameter sistem I&C EPR 1600 dan US_APWR 1700 yang dibandingkan dan dari perbandingan tersebut dapat dianalisis keunggulan dan kelemahan diantara keduanya. Tabel 1 memperlihatkan beberapa kesamaan dan perbedaan sistem I&C EPR 1600 dan US_APWR 1700.

Kesamaan diantara keduanya adalah:

- Penggunaan kode standar yang terkait dengan persyaratan desain sistem I&C.
- Secara umum keduanya telah menggunakan sistem I&C digital yang sudah terkomputerisasi, sehingga keduanya telah menggunakan teknologi maju yang telah mengutamakan prinsip kemudahan bagi pekerja untuk mengoperasikan sistem I&C dengan aman dan terkendali.
- Proses pemadaman reaktor yang sama- sama dikendalikan secara otomatis oleh sistem proteksi reaktor dan dilakukan oleh sistem *trip* reaktor.
- Sistem komunikasi menggunakan sistem komunikasi modern dan kabel serat optik.
- Suplai daya menggunakan UPS Class 1E.
- Sistem proteksi reaktor terdiri dari 4 sistem pendukung yang disusun secara redundan dengan konfigurasi mode 2/4, yaitu dari empat saluran pemicu cukup ada 2 saluran saja dengan kondisi logika 1, sehingga trip reaktor bisa dijalankan.

- Sistem *trip* reaktor terdiri dari 4 sistem pendukung yang menerima aktuasi dari sistem proteksi reaktor dan disusun secara redundan.
- Program QA menggunakan standar yang bersumber dari Amerika Serikat.
- Sistem kendali dan pemantauan pasca kecelakaan nuklir, diterapkan untuk membantu pekerja dalam rangka mengevaluasi status keselamatan pembangkit, sehingga meski dalam keadaan kecelakaan pembangkit tetap dalam keadaan terkendali.

Sedangkan perbedaandi antara keduanya adalah:

- Pada desain basis sistem I&C hampir keseluruhan sistem *safe-related* pada EPR 1600 terdiri dari 4 divisi yang masing-masing berdiri sendiri, sedangkan pada US-APWR hanya sistem proteksi pembangkit dan beberapa sistem pendukungnya saja yang terdiri dari 4 *train* secara independen.
- Sistem kendali dan pemantauan pada EPR 1600 beberapa sistem pendukungnya masuk dalam kelompok *safety-related* sedangkan pada US-APWR semua sistem pendukung sistem pemantauan dan kendali termasuk pada kelompok *non safety-related*.
- Sistem aktuasi beragam pada EPR 1600 terdiri dari 4 divisi yang disusun secara redundan serta termasuk dalam kelompok *safety-related*, sedang pada US-APWR sistem ini hanya terdiri dari satu sistem tunggal dan termasuk dalam kelompok *non safety-related*.
- Sistem ESF pada US-APWR aktuasi sistem ini bisa dilakukan secara manual melalui operator console.

Dari perbedaan diantara keduanya dapat dianalisis bahwa sistem I&C EPR 1600 memiliki sistem pendukung yang lebih banyak menerapkan redundansi yaitu semua sistem yang merupakan kelompok *safety-related* terdiri dari 4 divisi. Tidak hanya itu, beberapa pendukung sistem I&C yang pada US-APWR dimasukkan dalam kelompok *non safety-related* dalam EPR 1600 dimasukkan dalam kelompok *safety-related*. Hal ini dapat dijadikan sebagai indikasi bahwa sebenarnya sistem I&C EPR 1600 memiliki tingkat stabilitas keamanan yang lebih tinggi daripada sistem I&C US-APWR, tetapi tentu saja karena banyaknya duplikasi divisi dan banyaknya sistem yang dimasukkan dalam kelompok *safety-related* menyebabkan biaya instalasi ataupun perawatan yang harus dikeluarkan akan menjadi lebih mahal daripada sistem I&C US-APWR.

Tabel 1. Perbandingan arsitektur sistem I&C PLTN EPR 1600 dengan PLTN US-APWR 1700

No	Uraian sistem yang dibandingkan	EPR 1600 ^[5,6]	US-APWR 1700 ^[7,8]
1	Kode standar sistem I&C yang digunakan: <ul style="list-style-type: none"> ○ Sistem keselamatan ○ Aplikasi <i>safety-related</i> ○ Sistem <i>hardware</i> dan <i>software</i> ○ <i>Defense in depth</i>, Sistem proteksi reaktor ○ Program QA 	<ul style="list-style-type: none"> ○ IEEE Std 603-1998 (Reference 1) ○ Menggunakan kerangka TELEPERM XS (TXS) yang dijelaskan pada EMF-2110 (NP) (A) (Reference 3) ○ Mengikuti persyaratan 10 CFR 50.55a(a) dan GDC 1 ○ <i>Digital protection system topical report</i> (ANP-10281) (Reference 6) ○ 10 CFR 50.55a(a)(1) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ MUAP-07004 (Reference 7.1-2) ○ MELTAC, MUAP-07005 (Reference 7.1-3) ○ MELTAC, MUAP-07007 (Reference 7.1-5) ○ MUAP-07006 (Reference 7.1-4) ○ CFR Part 50, Appendix B (Reference 7.1-19) dan IEEE Std 7-4.3.2-2003 (Reference 7.1-20)
2	Spesifikasi umum <ul style="list-style-type: none"> ○ Papan kendali utama ○ <i>Safety related</i> I&C ○ <i>Non-safety related</i> I&C ○ Data komunikasi 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Terkomputerisasi penuh ○ Digital penuh ○ Digital penuh ○ TXS <i>Profibus protocol</i>, <i>Ethernet protocol</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Terkomputerisasi penuh ○ Digital penuh ○ Digital penuh, kecuali DAS ○ <i>Multiplex</i> penuh, sinyal class 1E

No	Uraian sistem yang dibandingkan	EPR 1600 ^[5,6]	US-APWR 1700 ^[7,8]
3	<p>Desain basis sistem I&C</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Konsep pertahanan berlapis ○ Redundansi ○ Diversitas ○ Independensi ○ Isolasi ○ <i>Interlocks</i> ○ Prioritas 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Terdiri dari tiga tingkatan jalur pertahanan: jalur pencegahan, jalur utama dan jalur pengurangan risiko. Didukung oleh empat kategori fungsi: fungsi keselamatan I&C, fungsi pengurangan resiko I&C, fungsi pembatasan I&C, fungsi operasi I&C ○ Diterapkan pada hampir sebagian besar sistem pendukung I&C dalam rangka untuk pencegahan kesalahan tunggal yang disebabkan oleh hilangnya fungsi dari sistem pendukung ○ Dibagi menjadi dua fitur diversitas: <ul style="list-style-type: none"> - Fungsional diversity, menggunakan variabel proses yang berbeda untuk mendeteksi pengaruh DBE dan inisiasi trip reaktor - Kerangka diversitas, menggunakan kerangka I&C yang berbeda untuk melengkapi fungsi sistem yang sama. ○ Diterapkan sehingga kesalahan tunggal tidak menyebabkan hilangnya fungsi keselamatan, dibagi menjadi: independensi di antara divisi redundan, independensi dari pengaruh DBE, independensi antara sistem I&C <i>safety-related</i> dan <i>non safety-related</i>. - ○ Selama 30 menit dikendalikan oleh sistem otomatis dan tidak bisa dikendalikan secara manual oleh operator. ○ tingkatan prioritas yang di bagi menjadi empat, dari yang paling tinggi sampai ke yang paling rendah yaitu: fungsi I&C yang terkait dengan keselamatan nuklir (fungsi aktuasi dan fungsi kendali), fungsi peminimal risiko I&C, fungsi pembatasan I&C dan fungsi operasional I&C (fungsi proteksi peralatan, kendali otomatis, kendali manual). 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Terdiri dari lima tingkatan pertahanan: sistem kendali reaktor, sistem proteksi reaktor, sistem aktuasi ESF, sistem operasi dan pemantauan, sistem aktuasi beragam. ○ Diterapkan pada sistem PSMS (<i>Safety related</i>) subsistem proteksi reaktor yang terdiri dari 4 <i>train</i> sistem redundansi dengan mode 2/4 ○ Diterapkan pada kasus mode kesalahan bersama pada sistem I&C Digital, baik <i>safety-related</i> dan <i>non-safety related</i> ○ Diterapkan di masing-masing <i>train</i> pada pendukung sistem PSMS dan dari sistem <i>non-safety related</i> (PCMS) ○ Isolasi sistem kelistrikan dan pemisahan secara fisik antara masing-masing <i>train</i> pada PSMS dan antara PSMS dengan PCMS. ○ Selama 30 menit dikendalikan oleh sistem otomatis dan tidak bisa dikendalikan secara manual oleh operator -
4	Sistem kendali dan pemantauan	Dilakukan oleh sistem SICS dan PICS pada ruang kendali utama dan RSS (<i>Remote Shutdown Station</i>)	Dilakukan oleh sistem PCMS.
5	Sistem pemadaman reaktor	Dikendalikan oleh sistem keselamatan otomatis yang menerima sinyal data dari instrumentasi pembangkit dan switchgear, sistem proteksi reaktor, beberapa sinyal kendali dari SICS dan PICS.	Didefinisikan sebagai pemadaman reaktor dingin. Dipicu oleh sistem proteksi reaktor dan ESF. Bisa dilakukan melalui RSS dan ruang kendali utama.
6	Sistem komunikasi	Masing-masing sistem I&C mengelola perubahan data internalnya (termasuk perubahan data antar divisi), dan jika diperlukan tanpa menggunakan sumber eksternal.	Multiplex penuh (Class 1E signal), <i>serial data link</i> dan <i>multi-drop data bus</i> , jaringan komunikasi serat optik

No	Uraian sistem yang dibandingkan	EPR 1600 ^[5,6]	US-APWR 1700 ^[7,8]
7	Sistem aktuasi beragam	Terdiri dari 4 divisi yang disusun secara redundan dan independen, merupakan unit aktuasi beragam yang menerapkan konfigurasi voting 2/4.	Masih berupa sinyal analog, diklasifikasikan pada <i>non safety-related</i> , memantau dan mengendalikan sistem <i>safety-related</i> dan <i>non safety-related</i> .
8	Suplai daya	Beberapa sistem pendukung menggunakan <i>Class 1E uninterruptible power supply</i> (EUPS).	Beberapa sistem pendukung menggunakan <i>Class 1E uninterruptible power supply</i> (UPS)
9	Sistem proteksi reaktor	Terdiri dari 4 divisi yang disusun secara redundan dan dikelompokkan dalam kategori <i>Safety-related</i> I&C. Berfungsi untuk melakukan trip reaktor, aktuasi sistem ESF, memproses variabel PAM tipe A-C, <i>interlocks</i> .	Terdiri dari 4 <i>train</i> yang disusun secara redundan dan dikelompokkan dalam kategori <i>Safety-related</i> I&C. Masing-masing <i>train</i> termasuk sistem instrumentasi nuklir dan sistem pemantauan radiasi pembangkit menerima sinyal proses dari sensor- sensor pengukuran.
10	Sistem ESF	Terdiri dari 4 divisi yang disusun secara redundan dan independen, dipicu oleh sistem proteksi reaktor.	Terdiri dari 4 <i>train</i> yang disusun secara redundan, dipicu oleh sinyal dari sistem proteksi reaktor dan dapat dipicu secara manual melalui <i>operator console</i> .
11	Sistem <i>trip</i> reaktor	Dipicu oleh sistem proteksi reaktor, terdiri dari 4 divisi yang disusun secara redundan dan independen, memakai konfigurasi 2/4 untuk persyaratan proses pemadaman reaktor, bisa dilakukan secara manual.	Dipicu oleh sinyal trip reaktor yang dikirim oleh sistem proteksi reaktor yaitu dengan menggerakkan <i>reactor trip breaker</i> yang berjumlah 2 unit pada masing-masing <i>train</i> .
12	Kelompok Sistem <i>Safety-related</i> I&C	Sistem keselamatan otomatis, sistem proteksi reaktor, sistem kendali aktuator dan prioritas, sistem instrumentasi teras reaktor, sistem instrumentasi luar teras reaktor, sistem pengukuran konsentrasi boron, sistem pemantau radiasi, sistem pemantau hidrogen, sistem pengukuran tekanan reaktor <i>vessel</i> yang kesemuanya dikendalikan dan dipantau oleh sistem SICS dan PICS.	Semua pendukung sistem PSMS.
13	Kelompok Sistem <i>Non safety-related</i> I&C	Sistem I&C kecelakaan berat, sistem kendali, pengawasan dan pembatasan reaktor, sistem proses otomatis, sistem kendali penggerak batang kendali, sistem pemantau gempa, sistem pemantau getaran, sistem deteksi kebocoran yang kesemuanya dikendalikan oleh sistem SICS dan PICS.	Sistem aktuasi beragam, Semua pendukung sistem PCMS.
16	Pengetesan dan pengawasan terhadap <i>self-system</i>	Menerapkan sistem <i>online self-testing</i> secara kontinyu.	Menerapkan fungsi <i>self-diagnosis</i> yang dilakukan secara kontinyu untuk mendeteksi kesalahan secara dini dan melakukan perbaikan secara <i>on-line</i> untuk improvisasi kehandalan sistem.
14	Fitur pendukung tambahan dan suplai daya cadangan	Suplai daya cadangan terdiri dari baterai dengan kemampuan 2 jam operasi dan generator diesel.	Daya cadangan AC/DC <i>class 1E</i> , komponen sistem pendingin air, sistem pensuplai air utama, sistem HVAC.
15	Sistem kendali dan pemantauan pasca kecelakaan nuklir	Dilakukan oleh keselamatan otomatis untuk menjaga pembangkit tetap dalam keadaan terkontrol dalam rangka untuk tetap menjaga kondisi pemadaman yang aman	Dilakukan oleh sistem pemantauan setelah kecelakaan (<i>Post Accident Monitoring</i> , PAM), berfungsi untuk membantu pekerja dalam rangka mengevaluasi status keselamatan pembangkit.

4. KESIMPULAN

Sesuai dengan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa secara umum antara PLTN EPR 1600 dengan PLTN US-APWR 1700 memiliki banyak kesamaan, yaitu keduanya sudah menerapkan teknologi arsitektur I&C digital yang sudah terkomputerisasi penuh dengan tingkat keselamatan tinggi, keduanya juga sama-sama memakai kode standar persyaratan desain yang bersumber dari kode standar Amerika Serikat. Keduanya menerapkan prinsip konsep pertahanan berlapis, redundansi, diversitas, independensi, isolasi, *interlocks* dan prioritas yaitu dengan menggunakan mode 2/4 dalam rangka untuk mengaktuasi sistem trip reaktor, namun ada sedikit perbedaan, yaitu hampir keseluruhan sistem *safety-related* pada EPR 1600 terdiri dari 4 divisi yang masing-masing berdiri sendiri, sedangkan pada US-APWR hanya sistem proteksi pembangkit dan beberapa sistem pendukungnya saja yang terdiri dari 4 *train* secara independen. Secara umum dari segi tingkat stabilitas keamanan sistem I&C EPR 1600 lebih unggul, sedangkan secara ekonomi sistem I&C US-APWR lebih murah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] AREVA, "Pressurized Water Reactor 1600 MWe (EPR) Nuclear Power Plant Olkiluoto 3", Functional Description With Poster, Finland, 2005.
- [2] RÄMÖ, J. and OY, P.V., "Clean Coal and Nuclear Technologies for Combating Climate Change", European Initiatives in Nuclear Energy Bedlewo/Poznan, Polandia, 9 Desember 2008.
- [3] KANEDA, M. *et.al.*, "US-APWR for Deployment in the United States", Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Technical Review Vol. 43 No. 4, Desember 2006.
- [4] _____, "Mitsubishi US-APWR", Mitsubishi Nuclear Energy System (MNC), Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Juni 2008.
- [5] _____, "U.S. EPR Final Safety Analysis Report", Chapter 7: Instrumentation And Controls Revision 0, Framatome ANP Inc., Januari 2007.
- [6] _____, "EPR Design Description", Framatome ANP Inc., Agustus 2005.
- [7] _____, "Design Control Document for the US-APWR", Chapter 7: Instrumentation And Controls, MUAP-DC007 Revision 1, Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Agustus 2008.
- [8] _____, "US-APWR Design Description 2006", Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Oktober 2006.