

MANAJEMEN KESELAMATAN PLTN PASCA KECELAKAAN FUKUSHIMA DAIICHI UNIT 1~4

Sahala M. Lumbanraja, Rr. Arum Puni Riyanti, Yohanes Dwi Anggoro

Pusat Pengembangan Energi Nuklir-BATAN
Jl. Kuningan Barat Mampang Prapatan, Jakarta 12710
Email: sahalal@batan.go.id

Masuk: 3 Agustus 2011

Direvisi: 20 September 2011

Diterima: 23 November 2011

ABSTRAK

MANAJEMEN KESELAMATAN PLTN PASCA KECELAKAAN FUKUSHIMA DAIICHI UNIT 1~4. Umumnya, kecelakaan nuklir berdampak psikologis lebih besar daripada berbagai kecelakaan lainnya. Setiap terjadi kecelakaan nuklir, penolakan masyarakat terhadap pemanfaatan energi nuklir untuk maksud damai semakin meningkat. Level radiasi yang dilepaskan secara kumulatif oleh kecelakaan Fukushima Daiichi 1-4 mencapai level tertinggi dari kriteria kecelakaan radiasi yang ditetapkan oleh IAEA, yaitu level 7. Kejadian eksternal yang terduga menyebabkan semua sistem catu daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan sistem pendingin yang berfungsi mendinginkan teras reaktor gagal total sehingga suhu teras meningkat secara drastis melebihi 25000C yang menyebabkan terjadinya reaksi antara kelongsong bahan bakar dengan oksigen. Makalah ini bertujuan untuk mengkaji manajemen keselamatan yang akan diterapkan jika Indonesia membangun PLTN pada masa datang. Kajian dilakukan terhadap kecelakaan PLTN Fukushima. Manajemen sistem keselamatan harus diperbaiki untuk mengantisipasi kecelakaan parah akibat kejadian eksternal, seperti membangun gedung diesel generator kedap air untuk PLTN yang sudah ada, meninggikan lokasi diesel generator, pemasangan hidrogen recombiner untuk manajemen gas hidrogen dalam teras, membatasi jumlah PLTN dalam satu lokasi, dll

Kata kunci: kecelakaan, keselamatan, Fukushima Daiichi

ABSTRACT

NUCLEAR REACTOR SAFETY MANAGEMENT IN THE POST- FUKUSHIMA DAIICHI UNIT 1-4 ACCIDENT ERA. Generally, the psychological impact of nuclear accidents is greater than many other accidents. Every nuclear accident, the public rejection of the use of nuclear energy for peaceful purposes is increasing. Level of cumulative radiation given off by accident Fukushima Daiichi 1 ~ 4 reached the highest level of radiation accident criteria established by the IAEA, which is level 7. Unforeseen external events that led to all power supply systems needed to drive the cooling system which cools the reactor core so that the temperature terraces complete failure increases drastically beyond 25000C that causes a reaction between the fuel cladding with oxygen. This paper aims to review the safety management will be applied if Indonesia build nuclear power plants in the future. The study was conducted to the Fukushima nuclear power plant accident. Safety management system must be repaired in anticipation of a severe accident caused by external events, such as the diesel generator building watertight for existing nuclear power plants, raising the location of diesel generators, installation of hydrogen recombiner for hydrogen gas in the core management, limiting the number of nuclear power plants in one location, etc.

Keywords: accident, safety, Fukushima Daiichi

1. PENDAHULUAN

Indonesia mempunyai tiga reaktor riset yang berada di Jakarta, Bandung dan Yogyakarta. Ketiga instalasi nuklir ini berada dekat ke perumahan penduduk. Oleh karena itu, sistem manajemen keselamatan ketiga instalasi ini menjadi prioritas utama, sehingga operasi reaktor tersebut tetap selamat dan aman. Keandalan operasi ketiga reaktor ini akan mendukung penerimaan masyarakat terhadap pemanfaatan nuklir untuk maksud damai. Indonesia berencana memanfaatkan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) sebagai sumber energi di masa akan datang. Pemanfaatan PLTN ini telah tertuang dalam Undang-undang No. 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional 2005-2025, dan Peraturan Presiden No. 5 tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional, dimana opsi energi baru terbarukan akan mencapai 5 % pada tahun 2025^[1]. Saat ini studi kelayakan tapak PLTN sedang dilakukan di provinsi Kepulauan Bangka Belitung.

Salah satu pertimbangan desain dasar PLTN adalah lokasi tapak dimana PLTN tersebut akan dibangun. Salah satu kriterianya adalah kondisi geologi, sejarah kegempaan dan tsunami yang pernah terjadi di sekitar lokasi tapak tersebut. PLTN Fukushima Daiichi unit 1-4 berada 10 m di atas permukaan laut, sedangkan Daiichi unit 5-6 dan Daiichi unit 1-4 berada 13 m di atas permukaan laut. Semua reaktor ini didesain mampu menahan gempa hingga 8,2 MMI (*mercantile magnetute intensity*) dan ketinggian tsunami 6 m^[2,3].

Menurut IAEA, sistem manajemen keselamatan mempunyai dua (2) tujuan utama, yaitu untuk meningkatkan unjuk kerja organisasi dengan cara perencanaan, pengendalian, dan supervisi yang berhubungan dengan situasi aktivitas normal, transien dan darurat; dan untuk membantu perkembangan dan mendukung budaya keselamatan dengan cara pengembangan dan penguatan kembali *attitude* dan sifat individu-individu dan tim sehingga memungkinkan mereka mengerjakan tugas mereka dengan selamat^[4].

Pasca kecelakaan PLTN Fukushima, berbagai negara yang tergabung dalam organisasi IAEA melakukan kajian dan evaluasi terhadap manajemen keselamatan PLTN yang sudah ada, dalam tahap pembangunan, maupun desain baru dari pengaruh kejadian eksternal dan internal. Berbagai rekomendasi dan tindakan dilakukan untuk meminimalisir dampak kejadian eksternal. Kecelakaan Fukushima terjadi akibat aliran listrik yang digunakan untuk mengoperasikan sistem pendingin mati total (*blackout*) sehingga suhu teras reaktor meningkat secara drastis. Untuk meminimalisir kecelakaan, diesel generator di tempat yang lebih tinggi atau menempatkannya di ruangan kedap air (*waterproof*).

Permasalahan yang akan dibahas dalam makalah ini adalah kecelakaan PLTN Fukushima, konsep desain BWR Fukushima, dan evaluasi pasca kecelakaan PLTN Fukushima. Makalah ini bertujuan untuk mengkaji, menganalisis sistem manajemen keselamatan instalasi nuklir pasca kecelakaan Fukushima.

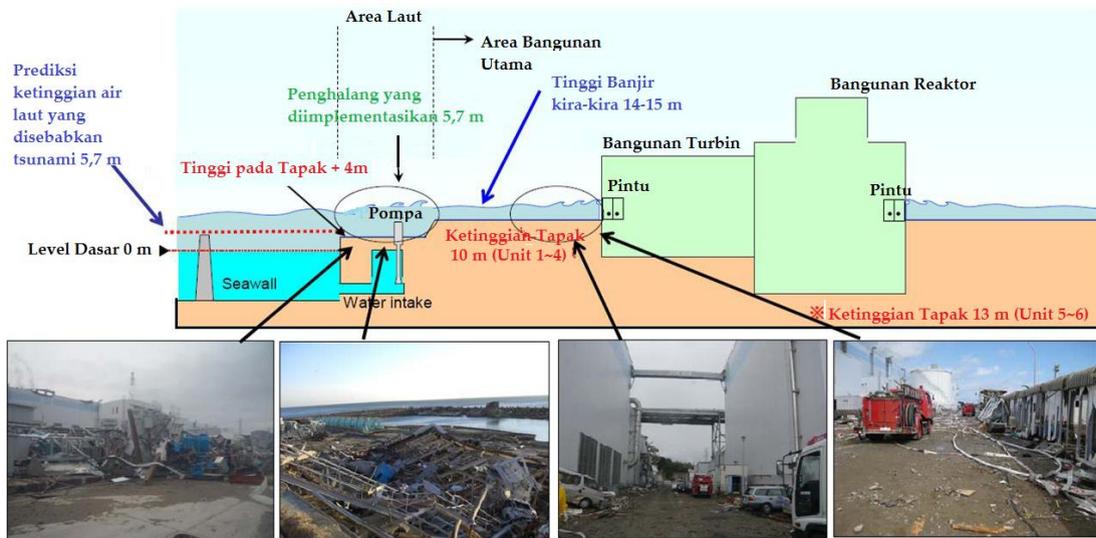
2. OPERASI PLTN PASCA KECELAKAAN FUKUSHIMA

Pasca kecelakaan PLTN Fukushima, semua anggota IAEA melakukan kajian komprehensif terhadap dampak yang ditimbulkan. Kajian meliputi kondisi sosio-ekonomi masyarakat, keberadaan instalasi nuklir yang beroperasi, sistem manajemen keselamatan dan keamanan, serta kesiapsiagaan kedaruratan.

2.1 Kecelakaan PLTN Fukushima

Di lokasi tapak Fukushima terdapat sepuluh (10) PLTN jenis BWR, yaitu enam Fukushima Daiichi (1,2,3,4,5,6) dan empat Fukushima Daini (1,2,3,4) yang dayanya masing-masing adalah antara 460 MWe hingga 1100 MWe dengan daya total 9944 MWe^[2]. Desain dasar PLTN ini mampu menahan gempa bumi berkekuatan 8,2 MMI dan ketinggian tsunami hingga 6 m. Fukushima Daiichi 1, 2, 3 dan 4 merupakan PLTN jenis BWR yang

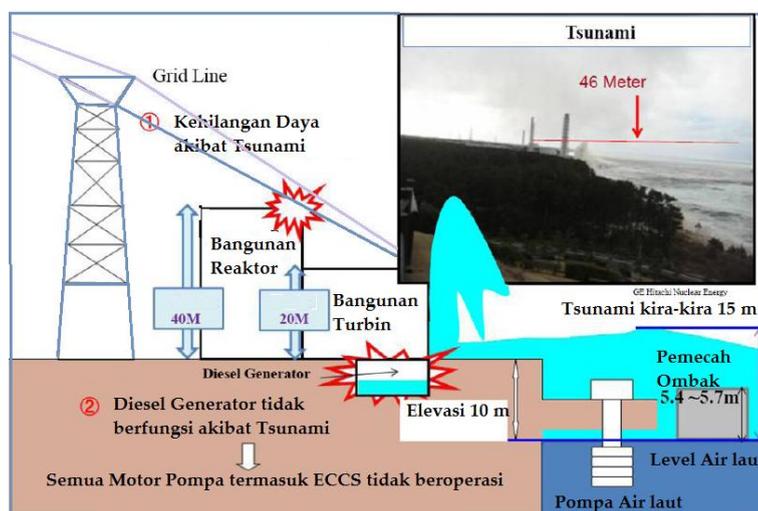
dirancang lebih dari 40 tahun yang lalu. Kondisi PLTN Fukushima Daiichi Unit 1 hingga 6, ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kondisi PLTN Fukushima Daiichi Unit 1 – 6^[2]

Pada tanggal 11 Maret 2011, pukul 14.46, gempa bumi berkekuatan 9 MMI menimbulkan tsunami dengan ketinggian 14 hingga 15 m. Tsunami yang disertai banjir dahsyat ini mencapai pantai prefektur Fukushima pada pukul 15.41 dan menghancurkan berbagai infrastruktur yang ada.

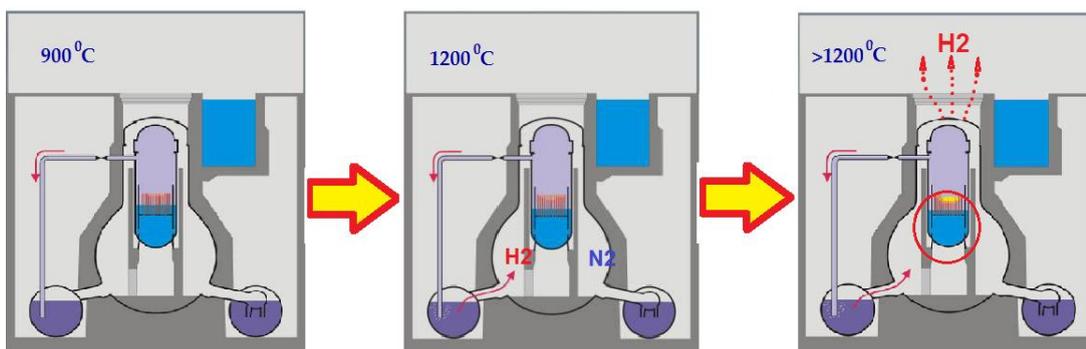
Seluruh PLTN Fukushima *shutdown* secara otomatis. *Emergency diesel generator* (EDC) dan *start-up* otomatis IC beroperasi dengan sukses. Banjir dasyat dan kerusakan jaringan listrik mengakibatkan catu daya padam total (*blackout*) sehingga kebutuhan operasi sistem keselamatan PLTN terputus total. EDC dan baterai cadangan juga tidak dapat berfungsi, khususnya pada PLTN Fukushima Daiichi unit 1 hingga 4, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Fukushima Daiichi 1, 2, 3 dan 4 merupakan PLTN jenis BWR yang dirancang lebih dari 40 tahun yang lalu.



Gambar 2. Penyebab Kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi^[3]

Kegagalan suplai listrik mengakibatkan sistem keselamatan reaktor, khususnya sistem pendingin jangka panjang untuk mendinginkan panas sisa peluruhan tidak berfungsi/hilang total. Ketidaktersediaan pendingin yang berlangsung hampir 28 jam mengakibatkan suhu teras dan bahan bakar meningkat secara drastis. Kenaikan suhu bahan bakar hingga mencapai 900°C mengakibatkan kelongsong bahan bakar menggelembung dan lama kelamaan akan pecah. Pada suhu lebih besar dari 1200°C akan terjadi reaksi eksotermik antara kelongsong Zr dan air yang menghasilkan zirkonium oksida dan gas hidrogen. Pada suhu 1800°C, kelongsong bahan bakar dan struktur baja meleleh. Suhu di teras meningkat hingga melebihi 2500°C dan mengakibatkan bahan bakar pecah serta tekanan di dalam pengungkung reaktor mencapai 8 bar akibat produksi gas hidrogen makin meningkat (Gambar 3).

Untuk menghindari ledakan di teras reaktor, teras reaktor didinginkan dengan air tawar dan air laut, kemudian tekanan di dalam pengungkung harus dikurangi dengan melepaskan gas hidrogen ke luar^[2]. Hal ini mengakibatkan ledakan dahsyat di luar pengungkung disertai lepasnya hasil produk fisi ke lingkungan. Pasca kecelakaan, beberapa nuklida hasil fisi I-131, Te-132, Cs-137, La-140, Xe-133 dan Nb-95 terdeteksi di stasiun pemantau Takasaki yang terletak 200 km dari Fukushima, bahkan terdeteksi juga di hampir semua belahan dunia lainnya^[5]. Dari hasil perhitungan menggunakan analisis situasi PLTN oleh *Japan Nuclear Energy Safety (JNES)*, dan *Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA)* bahwa diperkirakan total jumlah bahan radioaktif mencapai peringkat Level 7 yang merupakan representasi dari pengaruh radiasi PLTN Fukushima Daiichi 1, 2, dan 3^[6].



Gambar 3 Proses Ledakan Hidrogen PLTN Fukushima Daiichi^[2]

2.2 Konsep Desain BWR Fukushima Daiichi

BWR Fukushima Daiichi merupakan reaktor air ringan generasi pertama yang dikembangkan oleh *General Electric* sejak tahun 1950. Konsep desain dasar reaktor ini terdiri dari^[3]:

- Primary coolant circuit** –Reaktor ini hanya mempunyai satu sirkulasi primer dan tidak mempunyai sirkulasi sekunder untuk menghasilkan uap air dengan aliran dua fasa (air + uap). Uap yang dihasilkan teras dialirkan ke turbin, selanjutnya dari turbin dialirkan ke kondensor lalu dikembalikan ke bejana tekan. Dua *jet pump* digunakan untuk resirkulasi yang akan memaksa air kembali ke teras reaktor.
- Residual heat removal** – Dalam keadaan *shutdown*, sistem *Residual Heat Removal (RHR)* digerakkan oleh pompa listrik kecil untuk mensirkulasi air dari bejana tekan ke penukar panas dan mengalirkannya ke laut.
- Reactor Core Isolation Cooling (RCIC)** – RCIC tersedia di semua PLTN Fukushima Daiichi kecuali pada unit 1. Fukushima Daiichi unit 1 menggunakan *Isolation Condenser* yang fungsinya sama dengan RCIC.

- d. **Emergency Core Cooling System (ECCS)** - ECCS terdiri dari sub sistem tekanan tinggi dan tekanan rendah. Sistem *high pressure coolant injection (HPCI)* mempunyai pompa yang digerakkan oleh turbin. Sistem *Low-Pressure Coolant Injection (LPCI)* digunakan untuk menginjeksikan air melalui sistem RHR. Semua subsistem ECCS membutuhkan listrik untuk mengoperasikannya.
- e. **Containment System** (Sistem Pengungkung) - Sistem pengungkung berfungsi untuk melindungi reaktor dari gangguan eksternal dan energi yang dilepaskan ketika terjadi *loss-of-coolant accident (LOCA)*.
- f. **Containment depressurization** – Tekanan lebih dalam pengungkung (di atas 300 kPa) akan dialirkan melalui cerobong yang tingginya 120 m atau ke pengungkung sekuder.
- g. **Conditions for fuel meltdown** – Bahan bakar akan meleleh jika suhu di atas 2800°C. Sebelum bahan bakar meleleh, kelongsong akan retak dan mulai teroksidasi pada suhu 1300°C yang akan melepaskan gas hidrogen.
- h. **Spent Fuel Pool** – Bahan bakar bekas disimpan di kolam sebelum diolah kembali atau disimpan lestari. Suhu normal kolam adalah 30°C dan dirancang masih aman hingga mencapai 85°C tanpa resirkulasi paksa.
- i. **Tapak dan Tata letak** – Ke enam PLTN ini dibangun pada ketinggian 10 m di atas permukaan laut. Setiap unit dilengkapi dengan 2 unit diesel generator yang ditempatkan paralel dengan bangunan reaktor dan jaraknya 150 m dari pantai. Unit 1 hingga 4 dihubungkan dengan jaringan listrik 275 kV dan unit 5 dan 6 ke jaringan 500 kV.
- j. **Desain Seismik** – *Basic desain* reaktor ini mampu menahan gempa berkekuatan 8,2 MMI, dan pergerakan bumi secara horisontal hingga mencapai 438-489 Gal. Reaktor akan *shutdown* jika gempa mencapai 135 Gal.
- k. **Desain Tsunami** – Reaktor ini dirancang mampu menahan tsunami setinggi 5,7 m, dan dibangun pada ketinggian 10 m di atas permukaan laut.

2.3 Pasca Kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi

Akibat kecelakaan ini, penolakan masyarakat terhadap pemanfaatan PLTN semakin meluas, khususnya terhadap pengoperasian PLTN tua karena desain PLTN ini hanya menggunakan sistem keselamatan aktif, seperti Fukushima Daiichi. Padahal beberapa negara yang telah mengoperasikan PLTN generasi kedua ini berencana memperpanjang waktu hidup PLTN.

Efek negatif radiasi yang diakibatkan oleh Fukushima Daiichi mencapai level 7 skala *International Nuclear Event Scale (INES)*. Oleh karena itu, pemerintah Jepang membuat zona aman mencapai radius 20 km dari pusat radiasi untuk aktivitas masyarakat di daerah prefektur Fukushima. Penduduk pada radius 20 km direlokasi ke daerah lain.

Pasca kecelakaan dilakukan audit dan evaluasi terhadap kondisi PLTN Fukushima Daiichi unit 1- 6 untuk menghindari kecelakaan yang lebih parah. Kondisi paling parah dialami unit 1 hingga 3, sedangkan unit 5 hingga 6 tidak mengalami kerusakan, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Program mitigasi dan pemulihan pasca kecelakaan dibutuhkan untuk melindungi dan membongkar reaktor, memproteksi masyarakat dari akibat radiasi, dan mengetahui berbagai kontaminasi radioaktif ke lingkungan untuk jangka panjang^[6].

Tabel 1. Kondisi PLTN Fukushima Daiichi unit 1-6^[2]

Unit	1	2	3	4	5	6
Integritas Teras dan bahan bakar (bnn)	rusak paling parah	rusak paling parah	rusak paling parah	tidak ada bbn di teras	bagus	bagus
Integritas RVP	rusak & diestimasi bocor	rusak & diestimasi bocor	rusak & diestimasi bocor	tidak rusak	tidak rusak	tidak rusak
Integritas Pengungkung	rusak & diestimasi bocor	rusak & diduga bocor	rusak & diduga bocor	tidak rusak	tidak rusak	tidak rusak
Integritas Bangunan	rusak parah	rusak ringan	rusak parah	rusak parah	lobang ventilasi di atap gedung dibuka untuk menghindari ledakan gas hidrogen	
Injeksi air ke teras	dilanjutkan	dilanjutkan	dilanjutkan	tidak diperlukan	tidak diperlukan	tidak diperlukan
Injeksi air ke bejana pengungkung	ya	direncanakan	direncanakan	tidak perlu	tidak perlu	tidak perlu
Integritas bahan bakar dalam kolam	tidak diketahui (292)	tidak diketahui (587)	diduga rusak	diduga rusak	tidak rusak	tidak rusak
Pasokan daya listrik dari luar	tersedia	tersedia	tersedia	tersedia	tersedia	tersedia

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi unit 1~4 disebabkan kejadian eksternal yang tidak diperhitungkan sebelumnya baik dari segi lokasi tapak dan sistem catu daya listrik yang dibutuhkan untuk mengoperasikan semua sistem keselamatan. PLTN ini dirancang berdasarkan catatan sejarah kejadian eksternal yang sudah pernah terjadi. Unit 1~4 ini terletak pada ketinggian 10 m dari permukaan laut, sedangkan unit 5~6 terletak pada ketinggian 13 m dari permukaan laut, dan tinggi tembok pemecah ombak mempunyai ketinggian 5,7 m dari permukaan laut. Ketinggian tsunami yang mencapai kira-kira 15 m mengakibatkan banjir dan kerusakan infrastruktur PLTN unit 1~4, seperti diesel generator dan jaringan listrik dari luar.

Kehilangan sumber daya listrik total yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sistem keselamatan mengakibatkan semua sistem pompa tidak dapat digunakan untuk mendinginkan teras reaktor dan kolam penyimpanan bahan bakar bekas. Kehilangan sistem pendingin ini menyebabkan kenaikan suhu yang sangat drastis di dalam teras reaktor dan/atau di dalam kolam penyimpanan bahan bakar bekas. Pada suhu 1200 °C, kelongsong bahan bakar yang terbuat dari zirkon bereaksi dengan oksigen akan menghasilkan zirkon oksida dan gas hidrogen. Kenaikan suhu teras yang melebihi 2500°C dan produksi gas hidrogen mengakibatkan bahan bakar pecah dan tekanan di dalam pengungkung reaktor mencapai 8 bar.

Untuk menghindari ledakan di teras reaktor dan mengurangi risiko paparan radiasi yang lebih besar karena tekanan melebihi batas desain, gas hidrogen hasil reaksi antara kelongsong bahan bakar (Zr) dengan oksigen dilepaskan dari pengungkung reaktor melalui katup yang berada di atas teras reaktor. Injeksi air ke dalam teras reaktor juga dilakukan untuk mendinginkannya. Pelepasan hidrogen ke udara mengakibatkan ledakan dasyat yang menghancurkan bangunan PLTN. Pelepasan gas ke udara juga diikuti radioaktif hasil fisi

lainnya. Hal ini mengakibatkan rasa kuatir dan takut seluruh masyarakat dunia, khususnya masyarakat yang dekat ke lokasi PLTN ini. Dari hasil audit dan analisis yang telah dilakukan, reaktor unit 1-3 yang mengalami kerusakan paling parah, sedang unit 5-6 tidak mengalami kerusakan.

Pasca kecelakaan PLTN *Tree Miles Island*, Chernobyl, dan instalasi nuklir lainnya telah banyak dilakukan berbagai antisipasi untuk mencegah terulangnya kecelakaan parah instalasi nuklir, seperti penerapan *integrated management system (IMS)*, perbaikan pada desain baru PLTN, dll, tetapi kecelakaan parah masih juga terjadi karena luput mengantisipasi perubahan alam yang sangat ekstrim, seperti tsunami yang terjadi di Fukushima ini.

Beberapa Negara, seperti Jerman sudah mengurangi pemanfaatan PLTN sebagai sumber energi, tetapi sebagian besar masih tetap mempertahankannya. Untuk meningkatkan kepercayaan dan penerimaan masyarakat terhadap PLTN yang masih beroperasi, serta mengurangi kerugiannya di masa akan datang, faktor-faktor berikut perlu diantisipasi^[2,3,8] :

- Respon praktis terhadap kecelakaan parah
- Kemampuan dan kesiapsiagaan respon kedaruratan
- Manajemen krisis
- Budaya keselamatan
- Independensi fungsi regulator
- Manajemen keselamatan PLTN
- Kecukupan standar dan persyaratan keselamatan perlu ditingkatkan
- Kemungkinan kejadian eksternal ekstrim terhadap tapak PLTN
- Kolam tempat penyimpanan bahan bakar bekas
- Manajemen gas hidrogen
- Putus total aliran listrik (*total blackout*)
- Kehilangan pendingin
- Kerjasama bilateral, regional, dan internasional

PLTN Fukushima Daiichi unit 1 hingga 4 ini memberikan pelajaran berharga pada semua negara pengguna dan pemasok instalasi nuklir, maupun negara yang belum memanfaatkannya untuk mengantisipasi gangguan alam ekstrim di masa mendatang. Manajemen penanganan kecelakaan parah dan perencanaan kedaruratan dan kesiapsiagaan di dalam dan di luar tapak PLTN perlu dipersiapkan secara baik dan taktis. Kemampuan dan kesiapsiagaan respon kedaruratan harus selalu dievaluasi dan ditingkatkan setiap saat. Manajemen krisis untuk pengambilan keputusan, perintah dan kendali secara cepat dan terukur dengan melakukan komunikasi kepada masyarakat dan komunikasi antar pemangku kepentingan, termasuk negara tetangga.

Antisipasi dini terhadap kecelakaan perlu dilakukan dengan meningkatkan dan menerapkan budaya keselamatan secara konsisten pada semua level manajemen di lingkungan PLTN dan regulator. Independensi fungsi regulator diterapkan secara konsisten dan dapat dipertanggungjawabkan. Manajemen keselamatan PLTN yang ada perlu dievaluasi dan dilaksanakan dengan konsisten.

Negara yang akan memulai memanfaatkan PLTN harus mempersiapkan sumber daya manusia yang berkemampuan dan beretos kerja tinggi dengan berkerjasama dengan dunia internasional secara konsisten. Budaya keselamatan dan keamanan di seluruh tingkatan personil harus selalu dievaluasi, dikembangkan dan diterapkan secara bagus dan konsisten sesuai standar yang telah ditetapkan. Standar keselamatan juga perlu selalu dikembangkan.

Kecukupan standar dan persyaratan keselamatan perlu ditingkatkan untuk mengantisipasi berbagai ancaman yang mungkin terjadi baik dari internal dan/atau

eksternal. Untuk menghindari hilang totalnya catu daya, infrastruktur jaringan listrik dari luar harus ditingkatkan keandalan dan keamanannya. *Diesel generator* harus ditempatkan di lokasi yang lebih tinggi atau membangun rumah *diesel generator* tahan air (*waterproof*) sehingga ketika terjadi banjir *diesel generator* masih dapat difungsikan dengan aman. Ketika aliran listrik dari luar padam total (*blackout*), *diesel generator* sebagai catu daya darurat dapat berfungsi dengan baik. Catu daya diperlukan untuk memfungsikan semua sistem keselamatan, khususnya sistem pompa yang dibutuhkan untuk mendinginkan teras reaktor dan bahan bakar bekas.

Ledakan dasyat yang diakibatkan pelepasan gas hidrogen ke udara terbuka perlu diantisipasi dan dihindari. Pelepasan gas hidrogen juga diikuti zat radioaktif hasil fisi. Radioaktif hasil fisi yang lepas ke lingkungan akan sangat berbahaya terhadap makhluk hidup. Untuk meminimalisir pembentukan gas hidrogen dan pelepasan zat radioaktif hasil fisi ke lingkungan, perlu dipasang *hydrogen recombiner*. *Hydrogen recombiner* berfungsi untuk mencegah terbentuknya gas hidrogen ketika terjadi pemanasan ekstrim di dalam teras reaktor yang menyebabkan terjadinya reaksi antara kelongsong (Zr) dan oksigen.

Kerjasama bilateral, regional, dan internasional perlu ditingkatkan untuk mempercepat pengendalian kecelakaan parah sehingga dampaknya dapat diminimalisir. Informasi kondisi ril dari kecelakaan harus diberitahukan secara tepat dan cepat untuk menghindari kepanikan masyarakat umum.

Berbagai kelemahan desain PLTN yang sedang beroperasi perlu dielaborasi ulang untuk mengurangi risiko lingkungan dan investasi. Beberapa permasalahan yang perlu dielaborasi adalah:

- Multi unit pada satu lokasi tapak perlu dipertimbangkan kembali untuk meminimalisir risiko investasi jika terjadi kecelakaan parah
- Tapak dapat terhindar dari kejadian eksternal ekstrim, seperti ancaman gempa bumi dan tsunami
- Pertahanan berlapis (*defense in depth*) perlu ditingkatkan
- Kolam penampungan bahan bakar bekas terhindar dari kecelakaan parah
- Kehilangan catu daya (*Station Blackout*) perlu diantisipasi
- Kehilangan pendingin total
- Manajemen gas H₂
- Manajemen kecelakaan

Peningkatan unjuk kerja sistem keselamatan akan mengakibatkan biaya pembangkitan PLTN akan semakin besar dan semakin sulit bersaing dengan pembangkit lainnya.

Penerimaan masyarakat terhadap pemanfaatan energi nuklir semakin memudar sehingga negara Jerman mulai menutup operasi PLTNnya, dan beberapa negara yang semula berencana membangun PLTN terpaksa menunda sementara rencana mereka hingga waktu yang tidak ditentukan, tetapi sebagian besar negara pemilik PLTN lain masih tetap melanjutkan mengoperasikan dan membangun PLTN baru sesuai rencana dengan berbagai pertimbangan, seperti menjaga keamaan pasokan energi listrik untuk mendukung industri dan kebutuhan masyarakat.

Pelajaran dari kecelakaan PLTN Fukushima bagi Indonesia yang berencana mengoperasikan PLTN sebagai sumber energi listrik di masa datang adalah lebih hati-hati dan serius mempersiapkan berbagai infrastruktur sesuai dengan kriteria keselamatan yang telah ditentukan untuk meminimalisir kemungkinan terjadinya kecelakaan nuklir. Kriteria lokasi tapak jauh dari kemungkinan pengaruh kejadian eksternal, seperti tsunami. Kriteria

ketinggian lokasi tapak dari permukaan laut, sejarah kegempaan, dan populasi penduduk akan menjadi prioritas utama saat pemilihan tapak potensial di kemudian hari.

4. KESIMPULAN

Kecelakaan PLTN Fukushima unit 1~4 merupakan fakta yang relevan digunakan sebagai pelajaran untuk meningkatkan level keselamatan PLTN yang sedang beroperasi dan dan PLTN generasi maju. Manajemen sistem keselamatan diperbaiki dengan mengantisipasi kecelakaan parah akibat kejadian eksternal, seperti membangun gedung diesel generator kedap air (untuk PLTN yang sudah ada), (menempatkan diesel generator di lokasi yang lebih tinggi, pemasangan hidrogen *recombiner* untuk manajemen gas hidrogen dalam teras. Risiko investasi dapat dikurangi dengan membatasi jumlah PLTN dalam satu lokasi jika terjadi kecelakaan parah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. LUMBANRAJA S M, "Studi Ketersediaan PLTN Daya Kecil untuk Provinsi Bangka Belitung", Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir, Banten, Juni 2010.
- [2]. NOËL M, "The Fukushima nuclear accident What happened? Consequences? JRC involvement?", ATTEN, 2011 .
- [3]. ITER, "Fukushima Daiichi Nuclear Accident First considerations", Preliminary Report, ITER Report Fukushima Accident, 2011.
- [4]. IAEA, "Management of Operational Safety in Nuclear Power Plants", INSAG-13, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999
- [5]. CBTBO, "Operational experience and lessons learned from the earthquake near the coast of Japan on 11 March 2011 as well as the subsequent nuclear reactor accident at Fukushima", Diakses 7 Juli 2011.
- [6]. NISA, "INES Rating on the Events in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station", NISA, 23 Juli 2011
- [7]. WEISS F P, "Contributions of Technical Safety Organizations (TSOs) to Enhancing Nuclear Safety After the Fukushima Daiichi NPP Accident", w_d2_ F.P. Weiss. 1 Juli 2011
- [8]. WEIGHTMAN M, et. al, "IAEA International Fact Finding Expert Mission Of The Fukushima DaiichiNPP Accident Following The Great East Japan Earthquake And Tsunami", IAEA, 24 May – 2 June 2011, Final-Fukushima-Mission Report, 30 Juli 2011