

## Analisis Kebocoran pada Reaktor Fusi Nuklir dan Pencegahannya dengan Hidrogen Recombiner

Dwi Meisari<sup>1</sup>, Mochammad Ivan Sholahuddin<sup>2</sup>, Yunita Setyowati<sup>3</sup>

Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami no 36 Ketingan Surakarta

e-Mail: [meysari@student.uns.ac.id](mailto:meysari@student.uns.ac.id) , [yunitasetyowati3@student.uns.ac.id](mailto:yunitasetyowati3@student.uns.ac.id) ,  
[ivan.sholahuddin09@student.uns.ac.id](mailto:ivan.sholahuddin09@student.uns.ac.id)

**Abstract:** Nuclear technology is one of the technologies developed for the need for energy. But nuclear technology has such a big impact and it is difficult to make a recovery in case of a leak in the reactor. This study aims to determine the cause of leaks in nuclear fusion reactors and security systems and countermeasures both to prevent or overcome leaks in nuclear fusion reactors. This research uses descriptive research methods with a qualitative approach. Data collection is carried out through literature studies of previously existing research. The dasyat explosion caused by the release of hydrogen gas into the open air needs to be anticipated and avoided. To minimize the formation of hydrogen gas and the release of radioactive substances from fission into the environment, it is necessary to install a hydrogen recombiner. Hydrogen recombiner serves to prevent the formation of hydrogen gas when there is extreme heating in the reactor core which causes a reaction between cladding (Zr) and oxygen.

**Keywords:** radioactive leakage, nuclear radiation, hydrogen recombiner

**Abstrak:** Teknologi nuklir merupakan salah satu teknologi yang dikembangkan untuk kebutuhan akan energy. Namun teknologi nuklir memiliki dampak yang begitu besar dan sulit untuk melakukan pemulihan jika terjadi kebocoran pada reaktornya. Kajian ini bertujuan untuk mengetahui sebab terjadinya kebocoran pada reaktor fusi nuklir dan sistem keamanan serta penanggulangannya baik untuk mencegah atau mengatasi kebocoran pada reaktor fusi nuklir. Penelitiannya menggunakan metode penelitian deskriptif dengan pendekatan kualitatif. Pengumpulan data dilakukan melalui studi pustaka (literature) terhadap penelitian – penelitian yang telah ada sebelumnya. Ledakan dasyat yang diakibatkan pelepasan gas hidrogen ke udara terbuka perlu diantisipasi dan dihindari. Untuk meminimalisir pembentukan gas hidrogen dan pelepasan zat radioaktif hasil fisi ke lingkungan, perlu dipasang hydrogen recombiner. Hidrogen recombiner berfungsi untuk mencegah terbentuknya gas hidrogen ketika terjadi pemanasan ekstrim di dalam teras reaktor yang menyebabkan terjadinya reaksi antara kelongsong (Zr) dan oksigen.

**Kata kunci:** kebocoran radioaktif, radiasi nuklir, hidrogen recombiner

### 1. PENDAHULUAN

Pemerintah Indonesia menyatakan komitmen untuk mengurangi emisi sebesar 29% hingga tahun 2020 dalam forum G-20 di Pittsburgh, Amerika Serikat sejak tahun 2009 silam (Akmalie, 2020). Sumber energy yang bersih adalah syarat pembangkit listrik di era industry 4.0 agar kualitas lingkungan juga bersih. Pemanfaatan nuklir saat ini sudah sangat luas yang meliputi bidang kesehatan, industry, pertanian, peternakan, hingga bidang pertahanan (Wahyudi, 2020). Sejak tahun 2006 Presiden Susilo Bambang Yudhoyono sudah mengeluarkan Keputusan Presiden Nomor 5 pada Januari 2006. Isinya adalah, pada 2016 Indonesia sudah harus menghasilkan listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) (Sulaiman, 2019). Reaktor nuklir mulai dikembangkan sebagai sumber energy alternative sejak awal tahun 1950-an dan sejak saat itu teknologi nuklir berkembang pesat. Penguasaan teknologi reactor nuklir sengatlah penting mengingat Indonesia sedang mengalami krisis energy, sehingga dibutuhkan sumber Energi Baru dan Terbatukan (EBT) yang salah satunya adalah energy nuklir. Dimana nuklir adalah energy yang bersih tanpa menghasilkan polusi udara (Novalianda, 2020).

Perkembangan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) setiap tahun semakin bertambah, tercatat hingga Juni 2018 sudah ada 451 unit PLTN yang beroperasi di seluruh dunia yang tersebar di 30 negara dan 58 reaktor lainnya sedang dibangun, sebagian besar di Asia (Darmawati, 2020). Indonesia memiliki tiga reaktor nuklir riset yaitu Reaktor GA Siwabessy di Serpong, Reaktor Triga Mark di Bandung dan Reaktor Kartini di Yogyakarta. Selain itu Indonesia juga memiliki beberapa fasilitas nuklir lainnya seperti fasilitas iradiasi, fasilitas penyimpanan bahan bakar segar (fresh fuel), dan penyimpanan limbah bahan bakar nuklir (spent fuel) (Wahyudi, 2020). Reaktor riset dimanfaatkan untuk penelitian dan menghasilkan radioisotope. Akan tetapi, selain bermanfaat, reaktor riset nuklir juga memiliki risiko bahaya radiasi (Aprialiani & Widana, 2019)

Teknologi nuklir merupakan salah satu teknologi yang dikembangkan untuk kebutuhan akan energy. Namun teknologi nuklir memiliki dampak yang begitu besar dan sulit untuk melakukan pemulihan jika terjadi kebocoran pada reaktornya. Beberapa kasus kejadian kegagalan teknologi nuklir diantaranya adalah: Chernobyl, Ukraina tanggal 26 April 1986. Diperkirakan sekitar 56 kematian yang terjadi sebagai akibat langsung dari bencana ini, 47 orang di antaranya adalah pekerja reaktor nuklir, sedangkan 9 orang lainnya adalah anak-anak yang mengidap kanker thyroid. WHO me-release korban yang meninggal dunia sebagai akibat tidak langsung sebesar 9.000 orang (Yusabiran dkk, 2020).

Pada tanggal 11 Maret 2011, gempa bumi berkekuatan 9 MMI menimbulkan tsunami dengan ketinggian 14 hingga 15 m menjadi penyebab kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi unit 1~4. Kehilangan sumber daya listrik total yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sistem keselamatan mengakibatkan semua sistem pompa tidak dapat mendinginkan teras reaktor dan kolam penyimpanan bahan bakar bekas sehingga terjadi kenaikan suhu yang sangat drastis. 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 pengungku reaktor melalui katup yang berada di atas teras reaktor (Lumbanraja dkk, 2011).

Ledakan dahsyat 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 (Lumbanraja dkk, 2011).

Kajian ini bertujuan untuk menganalisis kebocoran yang terjadi pada reaktor nuklir dan pencegahan kebocoran gas hidrogen ke lingkungan dengan Hidrogen Recombiner.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini adalah penelitian mengenai reaktor fusi nuklir, kebocoran reaktor fusi nuklir, akibatnya jika terjadi kebocoran serta cara pencegahannya melalui hydrogen recombiner. Reaktor fusi nuklir sendiri merupakan sebuah teknologi yang dianggap aman dan terkendali oleh Jepang sebelum adanya kebocoran oleh tragedi Fukushima.

Penelitiannya menggunakan metode penelitian deskriptif dengan pendekatan kualitatif. Pengumpulan data dilakukan melalui studi pustaka (literature) terhadap penelitian – penelitian yang telah ada sebelumnya.

Data dan informasi yang telah dikumpulkan diolah dengan menggunakan analisis deskriptif kualitatif. Data yang dianalisis meliputi kebocoran reactor nuklir dan penjelasan mengenai hydrogen recombiner.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan dengan menelaah jurnal – jurnal penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai resiko reactor fusi nuklir dan hydrogen recombiner. Berdasarkan pengambilan data tersebut didapatkan hasil sebagai berikut.

#### 3.1. Kebocoran Reaktor Fusi Nuklir

Radiasi nuklir memiliki sifat yang tidak dapat dirasakan oleh panca indra manusia, dan pada tingkat tertentu dapat berdampak panjang, lintas generasi, dan lintas geografi sehingga dapat membahayakan kehidupan manusia dan lingkungan. Karakteristik tersebut menyebabkan masyarakat tidak mengetahui apakah mereka terpapar radiasi atau tidak.

Pemanfaatan tenaga nuklir di Indonesia saat ini cukup banyak walaupun belum ada pembangkit listrik tenaga nuklir. Pemanfaatan yang ada saat ini meliputi :

- a. Reaktor nuklir penelitian dan produksi radioisotop
- b. Fasilitas fabrikasi elemen bakar nuklir
- c. Fasilitas pengolahan limbah radioaktif
- d. Fasilitas penyimpanan bahan bakar bekas
- e. Penggunaan zat radioaktif untuk berbagai keperluan seperti : penelitian, kesehatan dan industry

(Budi Prayitno, 2008)

Berikut ini beberapa contoh mengenai aspek keamanan dari energi nuklir dalam rentang sejarah pengembangannya dimana diberikan catatan bahwa dalam kurun waktu diantara tahun 1955-1999 rata-rata 1 kecelakaan (kebocoran) terjadi setiap 2-3 tahun yang dirangkum oleh Agus Sutono, 2012 :

- a. Musibah kecelakaan pada reaktor fusi nuklir di kapal Angkatan laut Amerika Serikat (Wolters, 1986 dalam Agus Sutono, 2012).
- b. Musibah kilang daya nuklir SL1 di stasiun Uji coba Reaktor milik Komisi Tenaga Atom Amerika Serikat yang berjarak 50 km dari kota Idaho Falls. Pada tahun 1960 diketahui bahwa efek kebocoran menyebabkan boron (racun terbakar) sebagian besar hilang sehingga dilakukan langkah lanjutan untuk tetap bisa beroperasinya reaktor ini. Tanggal 3 Januari 1961 sebagai puncak kejadian menyebabkan korban langsung dan radiasi pada lingkungan disekitarnya. Tidak ada tindakan yang sempat dilakukan untuk mencegah musibah. Reaktor yang sudah padam selama 12 hari tersebut bisa dengan tiba-tiba menyala kembali dan meledakkan reaktor tersebut.
- c. Musibah TMI-2 di PLTN Three Mile Island di Harrisburgh yang menelan banyak korban jiwa dan efek radiasi yang terus menyebabkan efek genetik yang berlangsung lama. Musibah ini terjadi pada tanggal 28 Maret 1979, dimana reaktor baru beroperasi sekitar 1 tahun.
- d. Musibah Reaktor Chernobyl 4 di Ukraina 24 April tahun 1986. Korban yang tercatat puluhan ribu termasuk didalamnya munculnya mutasi gen karena radiasi yang dihasilkan menyebabkan peningkatan wanita penderita kanker. Lingkungan juga menjadi korban berikutnya. Kelahiran cacat, kanker thyroid dan kardiovaskular menjadi dampak lanjutan disamping terjadi juga pada hewan dan tumbuhan. Dampak fisik dan terutama pada genetik memiliki implikasi ekologi yang signifikan, yaitu dampak life history yang menyangkut 3 parameter utama keberlanjutan hidup yaitu: survival, pertumbuhan dan

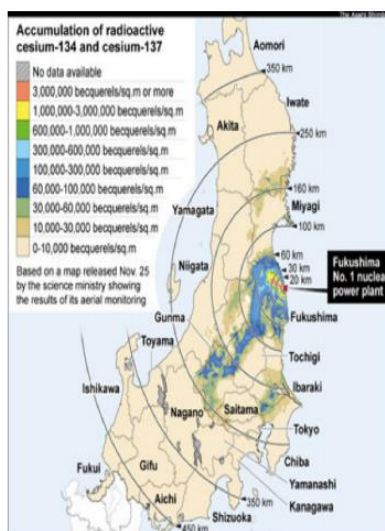
Jurnal Ilmiah CIVIS, Volume II, No 1, Januari 2012 Nilai Humanistik Dalam Pengendalian Sumber Energi Nuklir (Kajian Filosofis Kuasa Nilai Humanisme atas Teknologi ) 161 reproduksi (Toety Heraty, 2008 dalam Agus Sutono, 2012).

- e. Kebocoran Reaktor di Cape de la Hague Constantin Perancis tahun 1997 menunjukkan sebuah penelitian bahwa elemen radioaktif ditemukan sampai kerumput laut di kawasan Greenland
- f. Musibah di PLTN Tokaimura tahun 1999.
- g. Musibah di PLTN di Reaktor Nuklir di Jepang tahun 2011

Dengan kata lain bahwa contoh musibah yang terjadi ternyata banyak menimbulkan daya rusak baik pada manusia dan alam. Pada manusia banyak korban yang meninggal dunia secara massal dan dampak radiasi yang menunjukkan pada penurunan kualitas genetik bagi keturunannya secara menyolok.

Jepang merupakan negara yang mengunggulkan penggunaan energi nuklir untuk mencapai kebutuhan listriknya. Pada tanggal 11 Maret 2011, gempa Tohoku, berkekuatan 9.0 skala richer melanda Jepang dan memicu tsunami besar. Dampak dari gempa Tohoku tersebut salah satunya kebocoran reaktor nuklir milik PLTN TEPCO yang berada di daerah Fukushima. Ketika gempa terjadi, Reaktor nuklir unit 1, 2, dan 3 beroperasi, sedangkan reaktor unit 4, 5, dan 6 telah ditutup untuk pemeriksaan berkala. Reaktor 1, 2, dan 3 segera menjalani shutdown otomatis setelah terjadinya gempa.

Hasil survei yang dirilis oleh Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) pada tanggal 25 November 2011 menunjukkan pencemaran tertinggi zat radioaktif cesium 134 dan cesium 137 ditemukan di Hitachinaka, Ibaraki Prefecture pada level 40.801 Bq/m<sup>2</sup> . Selain itu, kandungan zat radioaktif sebesar 22.570 Bq/m<sup>2</sup> ditemukan di Yamagata Prefecture, dan 17.354 Bq/m<sup>2</sup> di Shinjuku ward Tokyo, dan beberapa di daerah lain di Uto Kumamoto Prefecture, Osaka, Chugoku, Kyushu, Nagano, Chiba, Gunma, Nigata dan Tochigi. Air hujan yang membawa partikel zat radioaktif menjadi salah satu media penyebaran radioaktif yang dilepaskan oleh reaktor nuklir Fukushima (Upik Sarjiati, 2018).



Sumber: Ishizuka 2011

**Gambar. 1.** Peta penyebaran zat radioaktif di Jepang

Terjadinya kebocoran reaktor disebabkan oleh struktur bangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Jepang tidak sesuai dengan syarat penting untuk membangun PLTN yang telah disepakati oleh negara anggota IAEA. Karena peran IAEA seharusnya memonitoring negara anggotanya dalam pembangunan PLTN di negaranya sudah mengikuti

syarat yang ditetapkan atau belum. Oleh sebab itu, buku ini membantu peneliti dalam penelitian peran IAEA dalam mengatasi kasus kebocoran reaktor nuklir di Fukushima.

Bocornya pipa reaktor nuklir Daichi Fukushima dan pembuangan limbah air radioaktif ke laut menyebabkan air dan produk laut tercemar oleh zat radioaktif. TEPCO menyatakan air limbah radioaktif yang dibuang ke laut mencapai 300 ton per hari sejak tahun 2011. TEPCO dan pemerintah menyatakan pembuangan limbah radioaktif tersebut tidak melebihi batas keamanan yang ditetapkan oleh pemerintah sehingga pencemaran radioaktif dalam dosis yang rendah tidak membahayakan kesehatan. Namun, beberapa peneliti mengungkapkan pendapat yang berbeda. Limbah radioaktif yang dibuang oleh TEPCO sebanyak 300 ton per hari belum termasuk limbah yang mengalir akibat kebocoran pipa reaktor nuklir. (Upik Sarjiati, 2018)

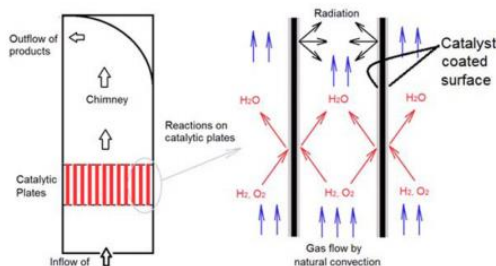
Ledakan dasyat yang diakibatkan pelepasan gas hidrogen ke udara terbuka perlu diantisipasi dan dihindari. Pelepasan gas hidrogen juga diikuti zat radioaktif hasil fisi. Radioaktif hasil fisi yang lepas ke lingkungan akan sangat berbahaya terhadap makhluk hidup. Untuk meminimalisir pembentukan gas hidrogen dan pelepasan zat radioaktif hasil fisi ke lingkungan, perlu dipasang hydrogen recombiner. Hidrogen recombiner berfungsi untuk mencegah terbentuknya gas hidrogen ketika terjadi pemanasan ekstrim di dalam teras reaktor yang menyebabkan terjadinya reaksi antara kelongsong (Zr) dan oksigen (Lumbanraja, dkk. 2011).

### 3.2. Pencegahan Kebocoran Reaktor Fusi Nuklir melalui Hidrogen Recombiner

Pada pembangkit listrik tenaga nuklir, terdapat sejumlah sumber potensial produksi hidrogen. Dibawah normal kondisi, hidrogen terus dihasilkan oleh radiolisis air dan korosi logam seiring waktu, ini bisa mencapai batas mudah terbakar. Selama insiden di nuklir, seperti *a loss-of-coolant accident (LOCA)* atau hilangnya pendingin, sejumlah besar hidrogen yang dilepaskan dapat menyebabkan ledakan seketika saat bertemu dengan oksigen dan suhu tinggi. Hidrogen juga diproduksi karena radiolisis air dalam produksi isotop medis sebagai pengangkut bahan bakar penyimpanan limbah dan reaktor fusi monuclear. Untuk mengurangi menumpukan konsentrasi hidrogen hingga pada batas bahaya, maka *active* atau *pasive hydrogen recombiners* dapat digunakan. *Hydrogen Recombiner* menggunakan katalis yang terbuat dari bahan berpori yang diolah dengan logam mulia seperti platinum dan/atau paladium. Pada katalis terdapat tempat dimana hidrogen dan oksigen saling berdekatan dan secara kimia bereaksi untuk membentuk air sehingga mengurangi konsentrasi hidrogen. (Szynkarczuk dkk, 2017)

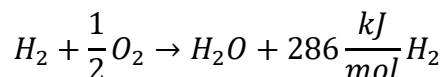
#### **Hidrogen Recombiner**

*Passive Auto-catalytic Recombiner (PAR)* adalah perangkat katalitik yang berdiri selama operasi normal, memulai reaksi spontan ketika campuran gas yang mengandung hidrogen mencapai katalis permukaan dan pasif menghilangkan hidrogen dari sekitarnya dengan mengubah ke air. PAR konvensional adalah kotak seperti penutup yang terbuka dari bawah dan atas dan memiliki *array* katalis dilapisi oleh pelat. Campuran gas mengalir di kedua sisi pelat berlapis katalis dan reaksi rekombinasi hidrogen berlangsung seperti yang digambarkan Gambar. 2. Campuran gas bersentuhan dengan pelat mengalami panas dan mengatur aliran yang digerakkan oleh daya apung (Agrawal & Balasubramanian, 2017).



**Gambar. 2.** *Passive Autocatalytic Recombiner* dengan reaksi permukaan pada pelat berlapis katalis

Reaksi oksidasi hidrogen adalah eksotermis, yang berarti terjadi pelepasan energi (Agrawal & Balasubramaniyan, 2017):



Panas atau energi yang dilepaskan pada permukaan katalis, dilakukan sepanjang pelat baja dan logam PAR *housing* yang meningkatkan suhu. Reaksi panas juga diubah menjadi gas karena konveksi alami dan disinerdiasi dari permukaan katalis panas ke PAR *housing*, pintu masuk *inlet* dan *outlet*. Hidrogen dan oksigen diangkut ke arah permukaan katalis oleh difusi molekul dan konveksi, sementara uap bermigrasi ke arah yang berlawanan. Maka tingkat rekombinasi hidrogen lokal bergantung pada: (1) tingkat transfer massal, (2) tingkat adsorpsi/desorpsi dan (3) tingkat reaksi permukaan. Proses ini secara langsung terkait dengan: suhu, gradien konsentrasi, sifat fisik dan kimia (kepadatan gas dan konduktivitas termal, spesies molekul dan termal diffusivitas, konstanta tingkat reaksi). Perbedaan dalam kepadatan gas yang disebabkan oleh gradien suhu dan konsentrasi mempercepat aliran gas ke atas, dimana pada gilirannya akan mempengaruhi koefisien dari transfer panas dan massa. (Rozeń, 2015)

Mekanisme rinci oksidasi hidrogen pada platinum (mekanisme reaksi kimia heterogen) adalah *multistage*, tergantung pada tujuan pemodelan. Dalam praktiknya, mekanisme terperinci biasanya disederhanakan ke reaksi eksotermik satu langkah, reaksi model diperoleh dari mekanisme kinetika terperinci dengan suatu penyederhanaan.

**Model Kazemo**

Untuk menunjukkan rekombinasi pada hidrogen konsentrasi rendah, tingkat reaksi cukup dijelaskan oleh persamaan kinetik berikut:

$$K = 4,695 \cdot T^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{c[H_2]^2}{C[O_2]}$$

dimana  $c[H_2]^2$  dan  $C[O_2]$  adalah konsentrasi molar dari hidrogen dan oksigen.

**Model The Schafer**

Model ini sering digunakan pada pemodelan reaksi rekombinasi katalitik hidrogen, tingkat reaksi dijelaskan sebagai berikut:

$$K = 14 \cdot \exp\left(-\frac{16,1 \cdot 10^6}{R \cdot T}\right) \cdot C[H_2]$$

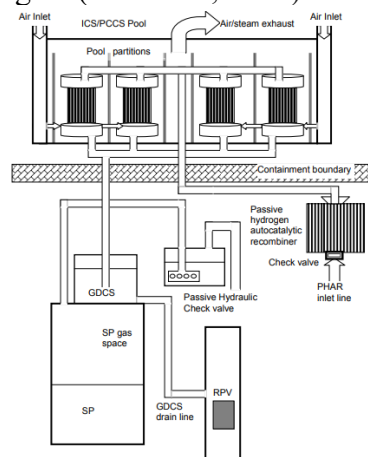
persamaan di atas merupakan persamaan Arrhenius dengan empiris parameter, yaitu faktor praeksponensial proposional konsentrasi hidrogen. (Avdeenkov dkk, 2018)

Spesifikasi desain dasar dan desain dari PHAR (*Passive Hydrogen Autocatalytic Recombiners*) untuk reaktor nuklir, adalah:

- a. Proses hidrogen rekombinasi harus dimulai pada volume hidrogen minimum tergantung pada suhu uap dan gas:
  - 1) Tidak lebih dari 2% pada saat kurang dari 100°C
  - 2) Tidak lebih dari 1% pada saat lebih dari 100°C
- b. Proses rekombinasi dimulai pada konsentrasi oksigen volume minimal tidak kurang dari 2% *autocatalytic* tanpa api rekombinasi hidrogen beroperasi dibawah konsentrasi hidrogen volume dari 4% hingga 95%
- c. Waktu PHAR mulai beroperasi tergantung pada uap dan air suhu campuran:
  - 1) Tidak lebih dari 10 menit pada saat kurang dari 100°C
  - 2) Tidak lebih dari 1 menit pada saat lebih dari 100°C

PHAR berorientasi pada diferensial tekanan maksimum, yang timbul dari berbagai model operasi dan kecelakaan reaktor nuklir. PHAR berorientasi pada aktivitas seismik selama gempa desain dan *MRA (Maximum Rated Earthquakes)*. Masa pakai modul autokatalitik PHAR adalah 5 tahun. Pemeliharaan umum adalah setiap 5 tahun. Waktu regenerasi tidak lebih dari 50 jam (Eckardt and Losch, 2000 dalam Revankar, 2019)

Fungsi dari *autocatalytic recombiner* adalah sebagai stasiun pemadaman karena ada kemungkinan akumulasi oksigen yang mungkin timbul karena radiolisis atau kebocoran dari bangunan penahan *axillary*. *Autocatalytic recombiner* mempunyai fungsi utama yaitu untuk memulai oksidasi hidrogen jika ada atau muncul oksigen di ruang *drywell*. Jika tidak ada oksigen di *drywell*, gas hidrogen hanya berperilaku seperti gas inert dan tidak memiliki implikasi keamanan lain bahwa itu adalah gas yang tidak dapat dikondensasikan yang mempengaruhi kondensasi *PCCS (Passive Containment Cooling Methods)*. Setelah diterapkan melalui *PCCS* maka akan menumpuk pada *Suppression Pool (SP)* ruang gas. *Autocatalytic recombiner* membuat yakin bahwa tidak ada masalah dengan hidrogen *drywell* untuk pemadaman stasiun berkepanjangan. (Revankar, 2019)



**Gambar. 3.** Desain Mitigasi *Passive Hydrogen* dan Sistem Penahan Pendinginan  
(Revankar, 2019)

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan pengkajian materi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa :

- Keleakasan reaktor fusi nuklir adalah 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.
- Contoh kebocoran reaktor nuklir yang terkenal adalah kebocoran atau kecelakaan dari Fukushima, Jepang. Terjadinya kebocoran reaktor tersebut disebabkan oleh struktur bangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Jepang tidak sesuai dengan syarat penting untuk membangun PLTN yang telah disepakati oleh negara anggota IAEA.
- Hidrogen Recombiner adalah alat berfungsi untuk mencegah terbentuknya gas hidrogen ketika terjadi pemanasan ekstrim di dalam teras reaktor yang menyebabkan terjadinya reaksi antara kelongsong (Zr) dan oksigen.

#### 5. SARAN

Pada artikel ini, hanya dilakukan pengkajian materi dari penelitian – penelitian yang pernah dilakukan. Sehingga disarankan untuk dilakukan penelaahan dan penelitian lebih lanjut untuk

mengetahui Kebocoran pada Reaktor Fusi Nuklir dan Pencegahannya dengan Hidrogen Recombiner.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, N., Ali, S. M., & Balasubramanian, V. (2017). Innovative hydrogen recombiner concept for severe accident management in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 323, 359-366.
- Akmalie, R. (2020). *Interaksi Kepentingan Stakeholder Dalam Rencana Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (Pltn) Di Indonesia* (Doctoral dissertation, UNIVERSITAS AIRLANGGA).
- Akmalie, R., 2020. *Interaksi Kepentingan Stakeholder Dalam Rencana Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (Pltn) Di Indonesia* (Doctoral dissertation, UNIVERSITAS AIRLANGGA).
- Aprialiani, D., & Widana, I. D. K. K. (2019). Implementasi Rencana Kontinjensi Nuklir Reaktor Riset Dalam Upaya Kesiapsiagaan Nuklir. *Jurnal Manajemen Bencana (JMB)*, 5(2).
- Avdeenkov, A. V., Sergeev, V. V., Stepanov, A. V., Malakhov, A. A., Koshmanov, D. Y., Soloviev, S. L., & Bessarabov, D. G. (2018). Math hydrogen catalytic recombiner: Engineering model for dynamic full-scale calculations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(52), 23523-23537.
- Darmawati, R., Ariani, M., & Monado, F. (2020). Desain Konseptual Teras Reaktor Cepat Berumur Panjang Berpendingin S-CO<sub>2</sub> dengan Bahan Bakar Uranium Metalik Alam. *Jurnal Fisika Unand*, 9(3), 401-407.
- Lumbanraja, S. M., Riyanti, R. A. P., & Anggoro, Y. D. (2011). Manajemen Keselamatan Pltn Pasca Kecelakaan Fukushima Daiichi Unit 1~ 4. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 13(2).
- Novalianda, S., Ramadhan, A., & Su'ud, Z. (2020). Perhitungan Burnup Desain Reaktor GFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains*, 22(2), 50-54.
- Prayitno, B. (2016). Kedaruratan Nuklir di Indonesia dan Penanggulangannya. *PIN Pengelolaan Instalasi Nuklir*, 1(01).
- Revankar, S. T. (2019). Passive containment cooling system with hydrogen recombiner for prolonged station blackout. *International Journal of Nuclear Safety and Security*, 1(1), 1-17.
- Rozeń, A. (2015). Modelling of a passive autocatalytic hydrogen recombiner—a parametric study. *Nukleonika*, 60(1), 161-169.
- Sarjiati, U. (2018). Risiko Nuklir Dan Respon Publik Terhadap Bencana Nuklir Fukushima Di Jepang Nuclear Risk And Public Response To Fukushima Nuclear Disasters In Japan. *Jurnal Kajian Wilayah*, 9(1).
- Sulaiman, F. (2019). Identifikasi Potensi, Dampak Dan Pengendalian Lingkungan Dalam Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. *Dedikasi: Journal of Community Engagment*, 2(3), 27-54.
- Sutono, A. (2012). Nilai Humanistik Dalam Pengendalian Sumber Energi Nuklir. *CIVIS*, 2(1/Januari).



- Szynkarczuk, J., Dickout, L., Zaidi, S.S. and Yaning, H.U., Cci Thermal Technologies Inc, 2017. *Catalyst for active hydrogen recombiner and process for making the catalyst*. U.S. Patent Application 14/852,809.
- Wahyudi, S. E. (2020). Upaya Mewujudkan Keamanan Nuklir Di Indonesia Melalui Revisi Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 Tentang Ketenaganukliran. *Jurnal Cendekia Waskita*, 4(1).
- Yusabiran, Y., Rumambi, F. J., & Wirdana, I. K. (2020). Evaluasi Kesiapsiagaan Batan Menghadapi Kegagalan Teknologi Nuklir Melalui Penerapan Occupational Health and Safety Assessment Series (OHSAS) 18001. *Jurnal Sains Teknologi & Lingkungan*, 6(1), 10-21.