
**FAULT TREE ANALYSIS (FTA) POTENSI LEDAKAN GAS HIDROGEN
PADA SISTEM TUNGKU REDUKSI ME-11 PROSES PEMBUATAN
BAHAN BAKAR NUKLIR PLTN**

Achmad Suntoro

Pusat Rekayasa Perangkat Nuklir – BATAN

Kawasan Puspipetek, Serpong, Tangerang Selatan 15314

E-mail: suntoro@batan.go.id

(Naskah diterima tanggal: 13 April 2012, disetujui tanggal: 23 Mei 2012)

ABSTRAK

FAULT TREE ANALYSIS (FTA) POTENSI LEDAKAN GAS HIDROGEN PADA SISTEM TUNGKU REDUKSI ME-11 PROSES PEMBUATAN BAHAN BAKAR NUKLIR PLTN. Telah dibuat diagram *Fault Tree Analysis (FTA)* untuk potensi ledakan gas hidrogen pada tungku reduksi ME-11 setelah kendali logik-nya ditambah (modifikasi). Diagram FTA ini dapat digunakan sebagai informasi tambahan dalam pembuatan program perawatan berkala dan langkah operasi dari tungku tersebut. Bertemunya dua kondisi yaitu pemicu ledakan dan komposisi gas hidrogen yang berpotensi meledak adalah fokus pencarian dalam FTA ini, dan dilakukan dengan cara mengurai dan merunut sistem tungku hingga ke penyebab awal dari dua kondisi tersebut bisa terjadi dalam waktu yang bersamaan. Dua lokasi berpotensi meledak teridentifikasi yaitu di ruang tungku dan di ruang pembakaran gas buang. Kemungkinan pemicu ledakan hanya berasal dari letikan api, api, dan benda panas, karena ME-11 tidak menggunakan gas hidrogen bertekanan tinggi. Namun demikian pemicu ledakan tersebut menjadi bagian dari proses reduksi yang berjalan, sehingga komposisi volume gas hidrogen selama proses berlangsung harus selalu diwaspadai.

Kata kunci: *fault tree analysis*, tungku reduksi, potensi ledakan hydrogen, pemicu ledakan hydrogen.

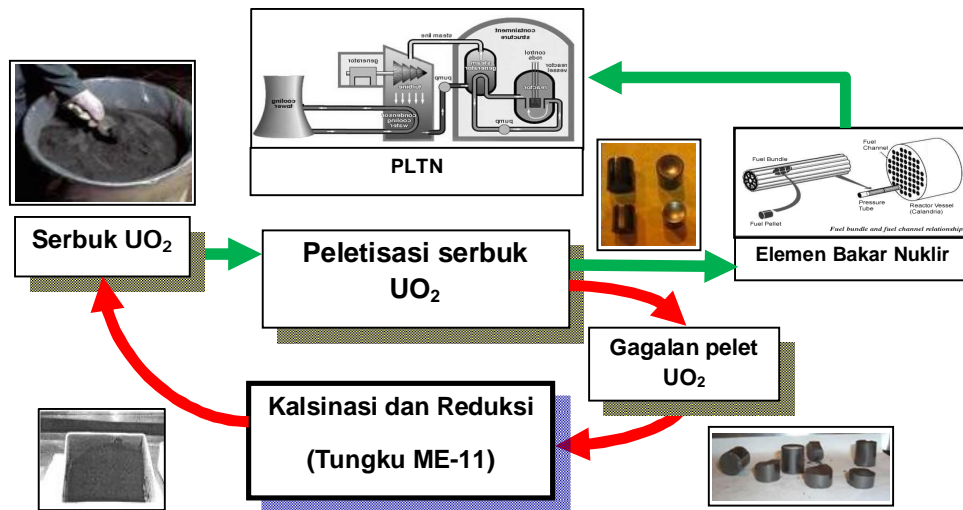
ABSTRACT

A FAULT TREE ANALYSIS (FTA) OF HYDROGEN EXPLOSION POTENTIALITY ON REDUCTION FURNACE ME-11 IN NUCLEAR POWER FUEL ELEMENT FABRICATION PROCESS. *Fault Tree Analysis (FTA) diagrams for the potentiality of hydrogen gas explosion in reduction furnace of ME-11 has been created after modification of its logic control. These FTA diagrams can be used as additional information in designing preventive maintenance program and operational steps of the furnace. The encountering of two conditions, i.e. explosion ignition and the potentially explosive of hydrogen gas, is the search focus of the FTA, and it may be done by breaking and tracing down to any possibility of initial causes for these two conditions to occur coincidentally. Two locations of the potentially explosive area were identified: furnace chamber and combustion chamber of the exhaust gas. The possible explosion ignitions for the furnace are only from spark, fire and hot material because the operation of the furnace does not use high-pressure hydrogen. However, these explosion ignitions are part of the on going reduction process,*

therefore it is important that the hydrogen gas volume composition during the process always be supervised.

Keywords: Fault Tree Analysis, reduction furnace, hydrogen explosion potentiality, hydrogen explosion ignition.

PENDAHULUAN



Gambar 1. Siklus operasi pembuatan bahan bakar nuklir.

Bagan umum posisi tungku kalsinasi dan reduksi ME-11 pada proses pembuatan bahan bakar nuklir reaktor daya (PLTN) di Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN adalah seperti pada Gambar 1. Proses kalsinasi dan reduksi tersebut digunakan untuk daur ulang produk gagal pelet bahan bakar, sehingga produk gagal pelet tersebut dapat diproses kembali menjadi bahan bakar yang memenuhi persyaratan. Proses kalsinasi dilakukan untuk merubah pelet UO₂ (produk gagal) menjadi serbuk U₃O₈ dan proses reduksi untuk merubah serbuk U₃O₈ tersebut menjadi serbuk UO₂ sehingga dapat diproses kembali menjadi pelet yang memenuhi persyaratan. Proses kalsinasi menggunakan atmosfer udara dan proses reduksi menggunakan atmosfer gas hidrogen.

Dalam proses yang melibatkan penggunaan gas hidrogen, prediksi

terjadinya kecelakaan perlu dikembangkan sehingga antisipasi yang tepat dapat disiapkan. Sebuah survey menggunakan *Major Hazard Incident Database* (MHIDAS), dari 81 kecelakaan yang melibatkan penggunaan hidrogen diperoleh data bahwa 86.3% tidak teridentifikasi penyebabnya^[1]. Teridentifikasinya penyebab suatu kecelakaan merupakan informasi berharga dalam proses disain, untuk membuat agar disain yang dibuat menjadi lebih baik. Keberadaan dokumen prediksi kecelakaan dapat membantu dalam proses identifikasi penyebab suatu kecelakaan, dan *Fault Tree Analysis* (FTA) merupakan salah satu bentuk dokumen prediksi kecelakaan. Dilaporkan di [2], telah terjadi kebocoran gas hidrogen di suatu *plant* di tahun 1991, dan sistem alarm akibat kebocoran tersebut telah aktif, namun operator sedang tidak ditempat. Sangat beruntung saat itu tidak

ada pemicu ledakan disekitar *plant*, sehingga ledakan tidak terjadi sampai kebocoran diketahui dan diatasi.

Kecepatan (*response*) operator terhadap suatu sinyal terkadang tidak secepat proses alam yang harus ditindak lanjuti, oleh karena itu *redundancy* antara operator dengan sistem elektronik sangat diperlukan, seperti yang diterapkan dalam modifikasi tungku kalsinasi-reduksi ME-11 di PTBN – BATAN [3]. Modifikasi kendali logik tungku ME-11 utamanya untuk meningkatkan faktor keselamatan operasi dengan menambahkan sistem *redundancy* [4] karena proses reduksi menggunakan gas hidrogen.

Suatu kecelakaan bisa terjadi bukan karena implementasi disain yang gagal dalam mendapatkan sistem bekerja yang handal, tetapi bisa juga karena situasi yang muncul dalam operasi dan belum diantisipasi cara mengatasinya. Oleh karena itu, analisis sistem harus di buat sebelum dan sesudah proses disain dilaksanakan, dalam rangka untuk meyakinkan sistem aman dalam bekerjanya.

Dalam makalah ini dijelaskan *Fault Tree Analysis* (FTA) yang dilakukan setelah disain modifikasi kendali logik tungku kalsinasi & reduksi ME-11 dilaksanakan. Dua prediksi kejadian untuk FTA yang dibahas dalam makalah ini yaitu potensi kecelakaan ledakan di dalam ruang tungku dan di ruang pembakaran gas buang.

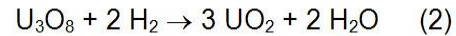
Kalsinasi - reduksi

Gagalan pelet UO_2 dari proses peletisasi pada Gambar 1 harus dirubah bentuk fisiknya menjadi serbuk UO_2 melalui proses kalsinasi dan reduksi agar dapat diproses kembali menjadi pelet UO_2 yang memenuhi persyaratan. Proses kalsinasi dilakukan dengan pemanasan memakai atmosfer udara dan terjadi reaksi kimia sebagai berikut:



Proses tersebut dilakukan di dalam tungku dengan suhu $400^\circ C - 500^\circ C$ dan waktu pemanasan 1 sampai 3 jam [6].

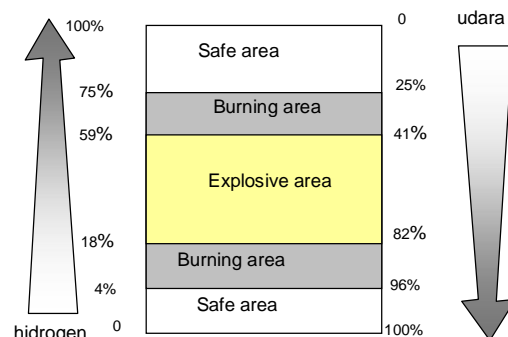
Serbuk U_3O_8 dari hasil rekasi (1) kemudian diproses reduksi dengan menggunakan gas hidrogen dan terjadi reaksi sebagai berikut:



Gas H_2 diberikan berlebihan sehingga lebih sisa reaksi dikeluarkan dari tungku dan dibakar di ruang pembakaran, sedangkan uap air (H_2O) yang terbentuk dari reaksi (2) dipisahkan dari gas H_2 sisa reaksi dengan proses pengembunan untuk kemudain di keluarkan dari tungku. Suhu tungku $750^\circ C$ dan waktu pemanasan 3 jam [6].

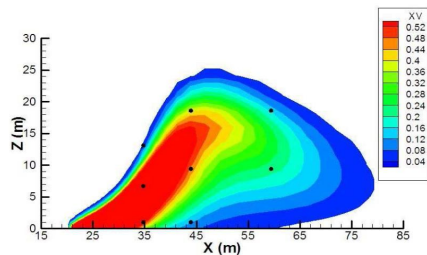
Gas hidrogen

Hidrogen adalah gas ringan (lebih ringan dari udara), tidak berwarna dan tidak berbau. Jika terbakar tidak menunjukkan adanya nyala dan akan menghasilkan panas yang sangat tinggi [7,8]. Gambar 2 adalah karakteristik gas hidrogen dalam kontek adanya tambahan *energy* dari luar terhadap campuran udara (prosentase volume).



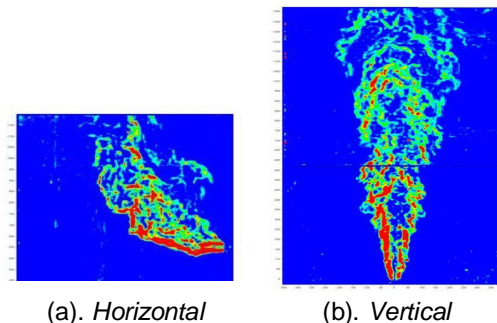
Gambar 2. Karakteristik campuran (volume) gas hidrogen dan udara [7].

Komposisi campuran (volume) tersebut dapat terbentuk jika terjadi pelepasan hidrogen bebas ke udara, seperti ditunjukkan pada Gambar 3, yaitu simulasi hidrogen cair pada suatu wadah dengan tutup wadah dibuka, sehingga gas hidrogen menguap ke udara dengan komposisi prosentase volume yang berubah secara *gradual* sebagai fungsi jarak dan waktu [9]. Gambar 3 menunjukkan simulasi distribusi untuk waktu 21 detik.



Gambar 3. Simulasi 21 detik terbentuknya komposisi (volume) gas hidrogen dan udara [9].

Dari simulasi tersebut, jika gas hidrogen yang lepas ke udara hendak dibakar, maka penyulutan api harus dilakukan tepat waktu. Penyulutan tidak tepat waktu dapat tidak membakar gas hidrogen (karena prosentase $<4\%$ atau $>75\%$, sisanya udara) atau menyebabkan ledakan (karena prosentase $\geq 18\%$ dan $\leq 59\%$, sisanya udara).



Gambar 4. Visualisasi pelepasan gas hidrogen ke udara menggunakan teknik foto BOS [10].

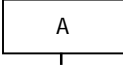
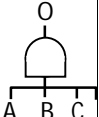
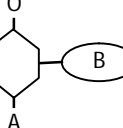
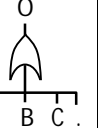
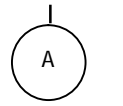
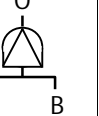
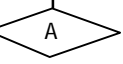

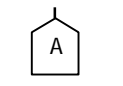

Posisi penyulutan juga menentukan, karena pola distribusi komposisi gas hidrogen dipengaruhi oleh kecenderungan gas untuk naik keatas (karena lebih ringan dari udara). Gambar 4 memperlihatkan pola distribusi komposisi (kualitatif) pelepasan gas hidrogen ke udara menggunakan teknik visualisasi (foto) *Background Oriented Schlieren* (BOS) [10]. Teknik ini digunakan karena hidrogen tidak berwarna sehingga tidak bisa dilihat. Pelepasan secara horizontal maupun vertical menunjukkan pola distribusi mengarah ke atas.

Ada lima pemicu timbulnya ledakan gas hidrogen jika komposisinya terletak pada *explosive area* di Gambar 2, yaitu [1]: (1) Efek inverse dari Joule-Thomson, (2) api atau letikan api, (3) difusi gas, (4) kompresi adiabatik yang tiba-tiba, dan (5) permukaan yang panas. Energy dari luar (pemicu) sebesar $20 \mu\text{J}$ dari letikan api telah mampu membakar atau meledakkan gas tersebut. Gas hidrogen juga dapat terbakar atau meledak dengan sendirinya pada *auto-ignition temperature* nya, yaitu minimum 585°C , jika komposisi campurannya terpenuhi [8]. Kondisi ini di tafsirkan dalam makalah ini sebagai pemicu ledakan karena permukaan panas.

Fault Tree Analysis (FTA)

FTA adalah sebuah bentuk analisis keselamatan yang sering diterapkan pada dunia penerbangan angkasa luar, elektronik, dan industri nuklir [11]. FTA adalah pendekatan *Top-Down* untuk menentukan penyebab potensi terjadinya sebuah kegagalan dalam sistem yang mengarah kepada sebuah kecelakaan. Analisis dilakukan dari kegagalan yang mungkin terjadi ditelusur mundur kebelakang untuk semua kemungkinan penyebabnya. Oleh karena itu, jika kejadian yang tidak diinginkan dalam sebuah *plant* telah diketahui, maka FTA tepat digunakan.

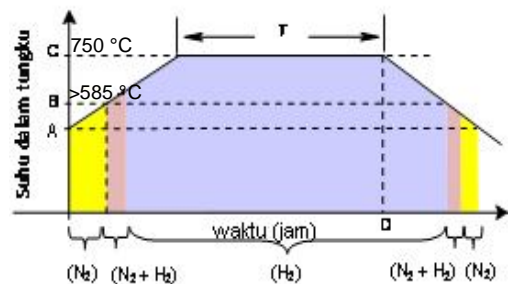
Tabel 1. Simbol FTA yang digunakan [12].

	A adalah deskripsi kejadian sebagai akibat dari kejadian dibawahnya.		O akan terjadi, jika A, B, C . . . dan semua input terjadi (logik AND).
	O akan terjadi, jika A terjadi dan berkembang menjadi B.		O akan terjadi, jika A atau B atau C atau salah satu atau lebih dari input terjadi (logik OR).
	Sumber penyebab kejadian. A terjadi karena kesalahan.		O akan terjadi, jika B terjadi dan A telah terjadi sebelumnya.
	Sumber penyebab kejadian. A terjadi diluar kendali sistem (faktor external).		Transfer-in, A adalah hasil operasi dari tempat lain yang sengaja untuk di-transfer.
	Sumber penyebab kejadian. A terjadi karena dalam proses selalu melalui kondisi tsb (faktor internal).		Transfer-out, A adalah hasil operasi yang disiapkan untuk di-transfer ke tempat lain.

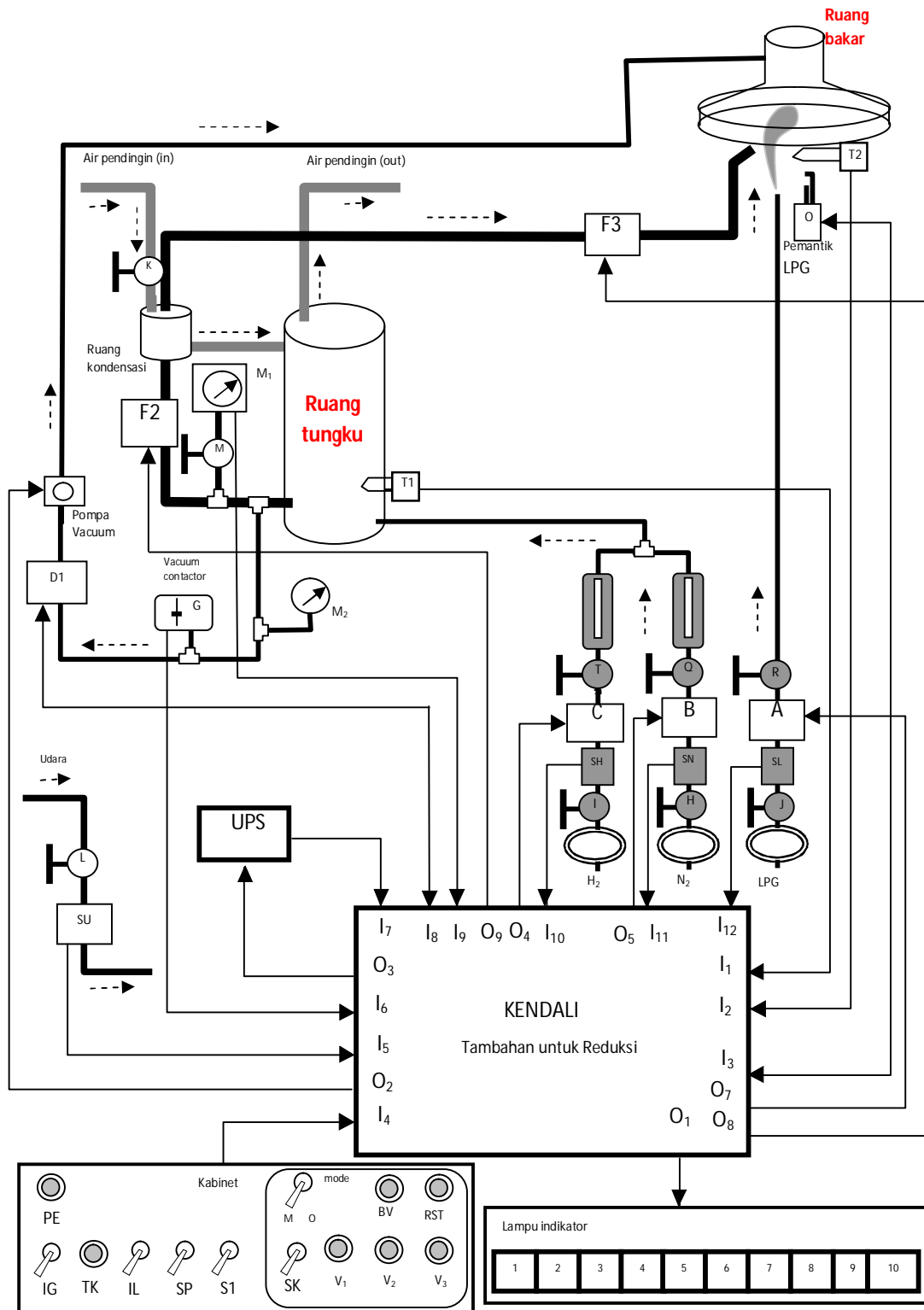
Dua jenis informasi diperoleh dari FTA: kualitatif dan kuantitatif. Hasil kualitatif adalah gambaran rute menggunakan simbol-simbol FTA yang menghubungkan penyebab awal kejadian sampai ke kejadiannya, sedangkan hasil kuantitatif adalah angka kemungkinan (*probability*) dari kejadian tersebut. Dalam makalah ini hanya FTA secara kualitatif yang akan digunakan. Tabel 1 adalah simbol-simbol FTA yang digunakan dalam makalah ini, dan aturan penggunaan simbol serta batasan FTA secara panjang lebar dijelaskan di [12].

TATA KERJA

Proses reduksi U_3O_8 dimulai dari titik A (suhu kamar), lihat Gambar 5. Pada posisi ini langkah-langkah persiapan dilakukan secara berurutan sebagai berikut: ruang tungku divakum, gas N_2 dialirkan ke tungku, api pembakar gas buang dinyalakan, dan suhu tungku dinaikkan. Gambar 5. Proses reduksi pada tungku ME-11.



Gambar 5. Proses reduksi pada tungku ME-11.



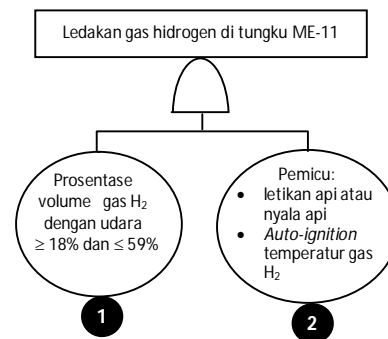
Gambar 6. Sistem Instrumentasi Kendali Logik tungku ME-11.

Ketika suhu tungku mencapai titik B, katup gas H₂ dibuka sehingga saat itu dua jenis gas (N₂ dan H₂) mengalir ke tungku bersama-sama beberapa saat. Selanjutnya katup gas N₂ menuju tungku ditutup dan hanya gas H₂ yang mengalir ke tungku. Membukanya katup H₂ dikendalikan oleh sebuah *thermo-switch*. Suhu tungku terus menaik hingga titik C dan ditahan untuk beberapa waktu (T) sesuai yang diperlukan. Jika waktu pemanasan (T) telah mencapai titik D maka suhu tungku diturunkan. Ketika suhu tungku kembali mencapai titik B maka *thermo-switch* kembali membuka katup gas N₂ dan dilanjutkan beberapa saat kemudian menutup katup gas H₂ (untuk beberapa saat N₂ dan H₂ masuk tungku bersama). Suhu tungku terus turun hingga mencapai kembali ke titik A dan proses reduksi selesai. Selama proses reduksi, gas H₂ atau N₂ yang masuk ke tungku untuk kemudian keluar, dan juga gas H₂ lebih banyak dibakar di ruang pembakaran oleh nyala api dari gas LPG, sehingga tidak ada gas H₂ yang dibuang ke atmosfer udara (lingkungan).

Gas LPG, gas H₂ yang masuk ke ruang tungku, dan gas H₂ yang keluar tungku (gas buang) dikendalikan oleh katup *normally-closed* (katup A, C, dan F2&F3 pada Gambar 6) sehingga jika sumber listrik padam katup akan menutup. Katup gas buang (F2&F3) dan katup LPG (A) dalam operasinya di *back-up* oleh UPS (*Un-interruptable Power Supply*) sehingga jika terjadi gangguan listrik padam, maka kedua katup tersebut tetap aktif (terbuka). Kondisi ini disiapkan agar suplai LPG tetap berjalan (sehingga nyala api LPG tetap ada) dan gas buang dapat keluar untuk dibakar meskipun terjadi gangguan listrik padam. UPS hanya digunakan untuk *back-up* katup-katup tersebut dan tidak untuk lainnya.

Dari lima pemicu ledakan yang dijelaskan di [1], hanya nomor (2) dan (5) yaitu letikan api dan permukaan panas yang mungkin terjadi pada sistem tungku ME-11, karena proses reduksi tidak menggunakan

hidrogen bertekanan tinggi sehingga pemicu yang berasal dari difusi, *inverse Joule-Thomson effect*, dan proses adiabatik mendadak tidak pernah terjadi. Oleh karena itu prinsip dasar FTA untuk tungku ME-11 ditinjau hanya dari dua kemungkinan pemicu ledakan tersebut yang terjadi pada komposisi volume berpotensi meledak, seperti di simbolkan dengan FTA pada Gambar 7.



Gambar 7. Bagan prinsip terjadinya ledakan di tungku ME-11.

Pada sistem tungku ME-11, pertemuan komposisi volume berpotensi meledak tersebut dengan pemicu ledakan hanya terjadi pada dua tempat, yaitu di dalam ruang tungku dan di ruang pembakaran gas buang (lihat Gambar 6 dan 8). Oleh karena itu FTA untuk disain modifikasi yang dilakukan hanya mengarah kepada dua tempat kejadian tersebut. Kemungkinan lain seperti kebocoran gas dalam instalasi tidak dicakup dalam FTA ini karena kondisi itu telah dicakup oleh sistem keselamatan bangunan secara menyeluruh dan tidak terkait dengan disain modifikasi yang dilakukan.

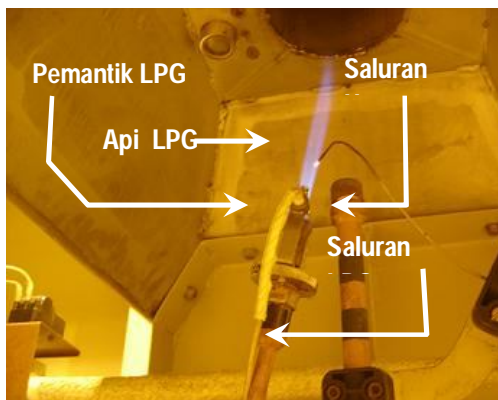
Dua penyebab utama potensi terjadinya ledakan di ruang tungku ME-11 adalah karena perangkat tungku & operasi dan kemurnian suplai gas H₂ yang digunakan. Pemicu penyebab ledakan adalah permukaan panas dari tungku, sedangkan letikan api (dari putusnya filamen misalnya) tidak mungkin terjadi karena jenis tungku ME-11 mempunyai filamen pemanas

berada di luar ruang tungku (*indirect heating*) - lihat Gambar 8.



Gambar 8. Tungku ME-11.

Tiga penyebab utama potensi terjadinya ledakan di ruang bakar gas buang tungku ME-11 adalah karena aliran gas H_2 tinggi, kemurnian suplai gas H_2 yang digunakan, dan karena perangkat & operasi. Pemicu ledakan di ruang bakar bisa terjadi karena letikan dari sistem pemantik penyalan gas LPG atau nyala api dari gas LPG (lihat Gambar 9).



Gambar 9. Ruang bakar gas buang ME-11.

Dari domain penyebab utama ledakan di dua tempat tersebut diatas, diurai dan dirunut ke arah penyebab awalnya menggunakan instrumen simbol-simbol FTA dengan prinsip mencari terjadinya bagan pada Gambar 7.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dua diagram FTA untuk potensi ledakan di ruang tungku dan di ruang bakar gas buang ditunjukkan pada Gambar 10 dan 11. Penguraian dan penelusuran untuk pembentukan kedua bagan tersebut dilakukan dengan mencari dua kondisi di dalam sistem ME-11 sehingga dua kondisi tersebut terjadi dalam waktu yang bersamaan. Ledakan akan terjadi jika dua kondisi tersebut bertemu sesuai dengan prinsip dasar pada Gambar 7. Kondisi pertama dalah pemicu ledakan dan kondisi ke dua adalah campuran volume gas yang berpotensi meledak mengacu pada Gambar 2.

Pemicu ledakan di ruang tungku ME-11 adalah suhu diatas *auto-ignition* ($585^{\circ}C$) dari gas H_2 . Suhu tersebut akan terjadi (dilalui) pada proses reduksi. Oleh karena itu penyebab pemicu ini tidak bisa dihindari keberadaanya karena merupakan bagian dari proses reduksi. Pemicu awal ledakan tersebut pada Gambar 10 muncul dengan kondisi berlabel ☼.

Pemicu ledakan di ruang bakar adalah api dari terbakarnya gas LPG dan letikan api dari sistem pemantik otomatis penyalan gas LPG. Dua jenis pemicu ini pada diagram FTA Gambar 11 muncul dengan kondisi berlabel ☼ dan ✱. Kedua jenis pemicu ini juga pasti terjadi karena merupakan kondisi bagian dari kegiatan proses reduksi. Dalam modifikasi kendali logik yang dilakukan, pemantik LPG dikendalikan oleh timer yang didisain untuk mengurangi potensi terjadinya ledakan dengan membatasi lama waktu operasi dari pemantik. Kegagalan timer muncul pada label Ⓢ di Gambar 11 diagram FTA.

Secara umum penyebab awal ledakan di ME-11 didominasi oleh komposisi gas hidrogen, karena pemicu nya hampir selalu ada selama proses reduksi berlangsung. Ada beberapa kemungkinan yang menyebabkan terjadinya komposisi

campuran gas H_2 berpotensi meledak. Untuk ruang tungku adalah kondisi dengan label ❶ s/d ❿ pada Gambar 10, dan ① s/d ⑦ pada Gambar 11 untuk ruang bakar.

Listrik padam

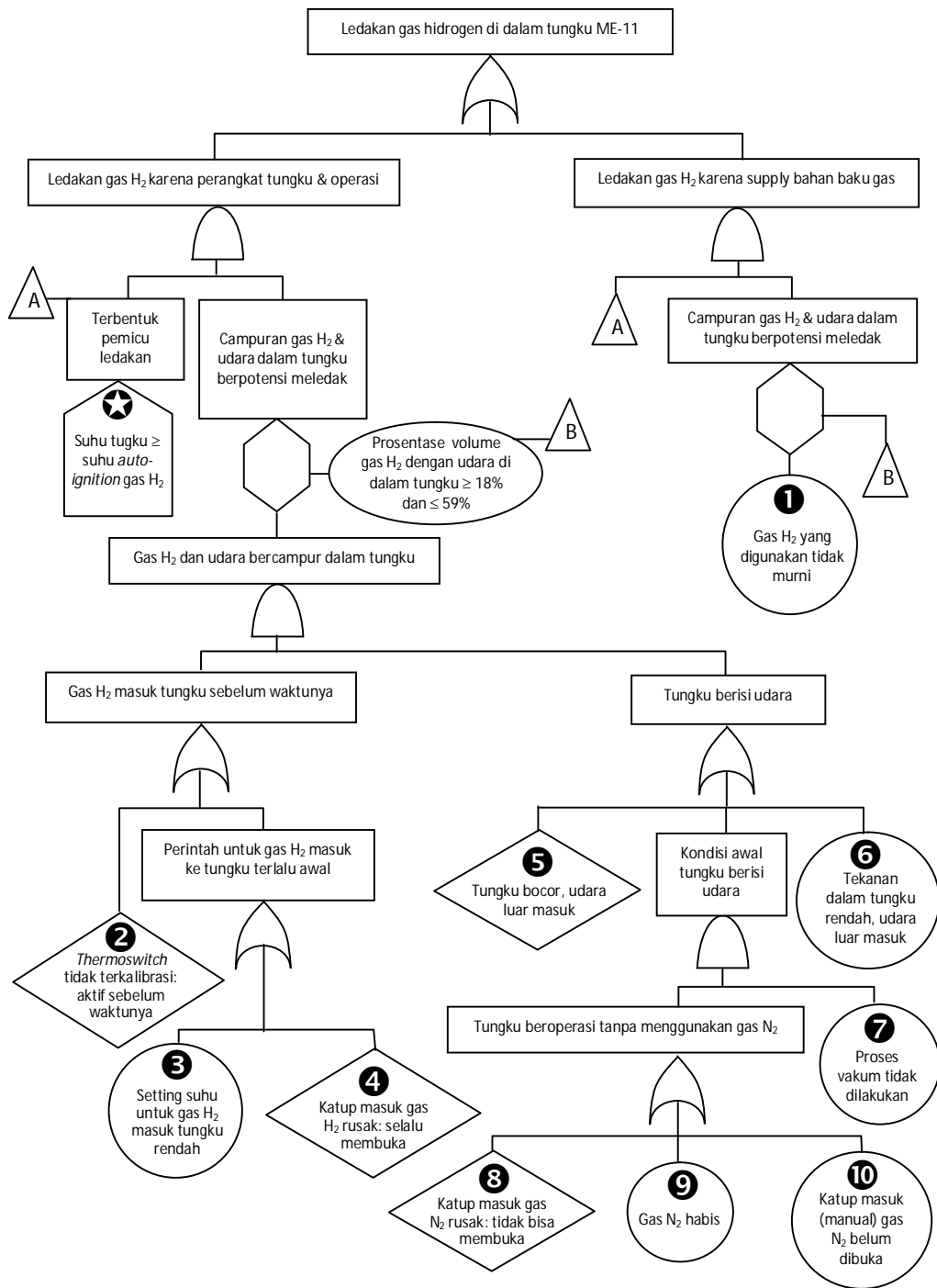
Listrik padam tidak menjadi penyebab terjadinya ledakan baik di ruang tungku maupun di ruang bakar. Aliran listrik di sistem tungku ME-11 hanya berpengaruh pada sistem pemanas tungku yang akan menurunkan temperatur ruang tungku hingga dibawah suhu *auto-ignition* nya. Potensi ledakan di ruang tungku hanya dipicu oleh campuran gas hidrogen, dan tidak dipengaruhi oleh padamnya listrik.

Di ruang bakar, padamnya listrik akan merubah gas H_2 yang masuk ke tungku menjadi gas N_2 sehingga potensi campuran gas bisa meledak yang keluar tungku makin menjauh. Jika sistem UPS ME-11 gagal bekerja, maka saluran gas keluar tungku menutup dan api LPG padam. Tidak ada potensi ledakan terjadi di ruang bakar.

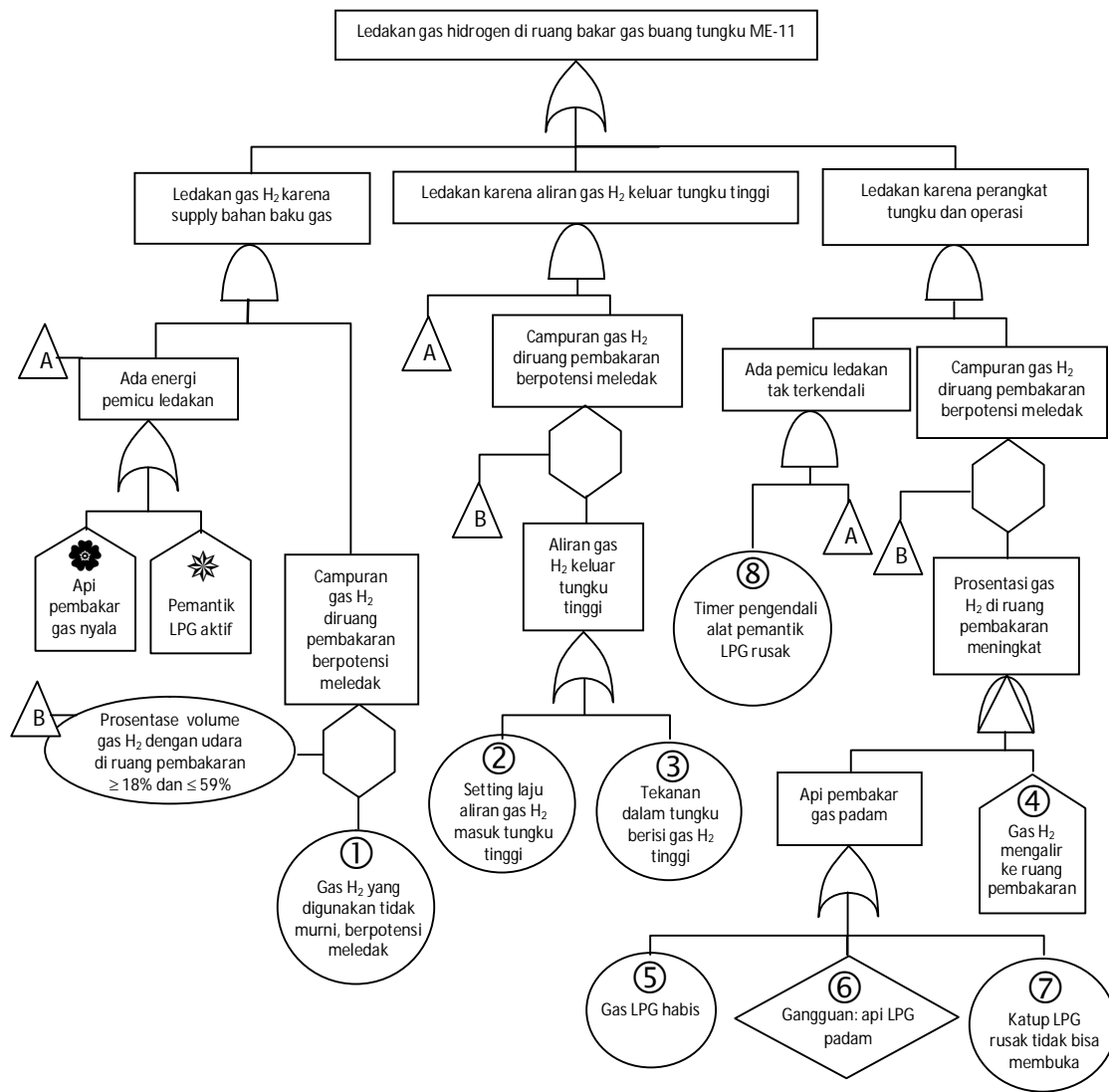
Pencegahan ledakan di ruang tungku dilakukan dengan cara pencegahan terbentuknya komposisi campuran

berpotensi meledak di ruang tungku. Gas H_2 yang masuk ke ruang tungku akan diganti secara otomatis dengan gas N_2 ketika listrik padam, sehingga campuran komposisi meledak pada Gambar 2 di ruang tungku akan terganggu (tidak terjadi). Pelaksanaan cara ini dilakukan dengan menggunakan katup H_2 (katup C pada Gambar 6) *normally-close* dan katup N_2 (katup B pada Gambar 6) *normally-open* sehingga jika listrik padam, maka secara otomatis gas H_2 berhenti mengalir dan gas N_2 mulai mengalir.

Antisipasi rusaknya katup yang bekerja *normally-close* dan *normally-open* dilakukan berturut-turut dengan *redundancy* seri dan paralel seperti yang telah dilakukan pada Gambar 12. Penggunaan gas LPG dan H_2 harus dilakukan menggunakan *redundancy* katup seri karena kedua gas tersebut berpotensi menimbulkan bahaya jika lepas ke udara (katup A dan C di Gambar 6), sehingga rusaknya salah satu katup (bocor misalnya) masih bisa di tutup oleh katup *redundancy* nya. Untuk gas N_2 (katup B di Gambar 6) yang digunakan sebagai gas pendorong (*flush*) yang bekerja *normally-open* dioperasikan menggunakan katup paralel.



Gambar 10. Diagram FTA potensi ledakan di dalam tungku.



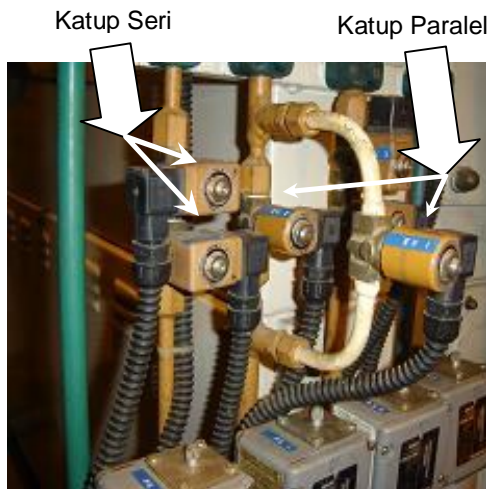
Gambar 11. Diagram FTA potensi ledakan di ruang pembakaran gas buang.

Pencegahan ledakan di ruang tungku dilakukan dengan cara pencegahan terbentuknya komposisi campuran berpotensi meledak di ruang tungku. Gas H₂ yang masuk ke ruang tungku akan diganti secara otomatis dengan gas N₂ ketika listrik padam, sehingga campuran komposisi meledak pada Gambar 2 di ruang tungku akan terganggu (tidak terjadi). Pelaksanaan cara ini dilakukan dengan menggunakan katup H₂ (katup C pada Gambar 6) *normally-close* dan katup N₂ (katup B pada

Gambar 6) *normally-open* sehingga jika listrik padam, maka secara otomatis gas H₂ berhenti mengalir dan gas N₂ mulai mengalir.

Antisipasi rusaknya katup yang bekerja *normally-close* dan *normally-open* dilakukan berturut-turut dengan *redundancy* seri dan paralel seperti yang telah dilakukan pada Gambar 12. Penggunaan gas LPG dan H₂ harus dilakukan menggunakan *redundancy* katup seri karena kedua gas tersebut berpotensi menimbulkan bahaya

jika lepas ke udara (katup A dan C di Gambar 6), sehingga rusaknya salah satu katup (bocor misalnya) masih bisa di tutup oleh katup *redundancy* nya. Untuk gas N_2 (katup B di Gambar 6) yang digunakan sebagai gas pendorong (*flush*) yang bekerja *normally-open* dioperasikan menggunakan katup paralel.



Gambar 12. Redundancy katup gas seri & paralel.

Suplai Gas H_2

Kondisi label ❶ dan ① pada Gambar 10 dan 11, adalah penyebab awal ledakan karena suplai bahan baku gas H_2 yang digunakan tidak murni. Kondisi ini bisa berpotensi mempunyai komposisi campuran yang berpotensi meledak ketika di ruang tungku atau di ruang bakar gas buang, yang masing-masing bertemu dengan pemuncunya. Untuk mencegah hal ini, gas H_2 yang akan digunakan dalam proses reduksi harus melalui perangkat deteksi kemurnian gas. Jika gas yang digunakan tidak murni atau diluar batas kemurnian yang diperbolehkan, maka operasi reduksi tidak boleh dilanjutkan.

Perangkat & operasi

Terbentuknya campuran gas H_2 dengan udara yang berpotensi meledak di ruang tungku disebabkan oleh pertama keberadaan udara di ruang tungku yang

seharusnya hal ini tidak boleh terjadi, dan kedua masuknya gas H_2 ke ruang tungku sebelum waktunya. Dua gas ini berpotensi membentuk campuran yang berpotensi meledak, walaupun bisa juga campuran tersebut tidak terbentuk (Gambar 2).

Penyebab awal terjadinya gas H_2 masuk sebelum waktunya adalah kesalahan *thermoswitch* yang tidak terkalibrasi (❷) sehingga katup C pada Gambar 6 membuka sebelum waktunya, atau kesalahan operator dalam menentukan suhu masuk gas H_2 (❸) jika mode operasi manual yang digunakan, atau katup C tersebut rusak selalu membuka (❹).

Penyebab awal keberadaan udara di ruang tungku adalah karena ruang tungku bocor (❺), atau tekanan di ruang tungku rendah (❻) sehingga udara luar masuk ke tungku melalui saluran keluarnya, atau dari awalnya ruang tungku telah berisi udara.

Kecil kemungkinan ruang tungku bocor tanpa diketahui sebelumnya karena sistem tungku ME-11 menggunakan *indirect-heating* sehingga ruang tungku dapat dikeluarkan dan dapat dilihat fisiknya secara visual (lihat Gambar 8).

Rendahnya tekanan didalam tungku telah dimonitor oleh sebuah *pressure-switch* M1 sehingga katup gas buang F2 & F3 akan ditutup jika tekanan tungku lebih rendah dari udara di luar (lihat Gambar 6). Kedua katup dibuka kembali jika tekanan di ruang tungku telah berada dalam batas yang diperbolehkan. Katup F3 dibuka terlebih dahulu untuk beberapa detik baru kemudian F2 dibuka, hal ini dilakukan untuk menghindari efek hembusan (*transient*) dari tekanan gas ruang tungku yang keluar tiba-tiba yang berpotensi mematikan nyala api LPG

Awal ruang tungku berisi udara dikarenakan proses *vacum* tidak dilakukan (❷) oleh operator diawal operasi (tidak mengikuti prosedur operasi), dan operasi reduksi tidak menggunakan gas N_2 . Gas N_2

tidak digunakan karena katup manual gas N_2 (katup H pada Gambar 6) tidak dibuka oleh operator (⑧) karena tidak mengikuti prosedur operasi, atau persediaan gas N_2 habis (⑨), atau katup masuk N_2 ke ruang tungku (katup B pada Gambar 6) rusak tidak mau membuka (⑩). Gas N_2 digunakan untuk mengisi ruang tungku di awal operasi setelah proses vacuum dilakukan sehingga tidak ada kesempatan udara mengisi ruang tungku ketika operasi berlangsung.

Di ruang bakar, aliran gas buang yaitu gas H_2 lebihan reaksi mengalir keluar tungku untuk dibakar (④). Tetapi jika api pembakar yang berasal dari nyala LPG padam, maka konsentrasi gas H_2 di ruang bakar akan meningkat karena tidak dibakar. Campuran gas di ruang bakar tersebut bisa mencapai campuran berpotensi meledak. Jika saat itu api atau letikan api untuk menyalakan LPG terjadi, maka ledakan terjadi.

Api LPG padam disebabkan oleh gas LPG habis (⑤), atau gangguan lain yang menyebabkan api padam (⑥), atau katup LPG A pada Gambar 6 rusak tidak bisa membuka (⑦). Antisipasi padamnya nyala api LPG dilakukan dengan membuat alat pemantik otomatis yang akan berusaha menyalakan kembali dengan letikan apinya. Jika penyalaan ini diserahkan kepada operator secara manual, maka sangat mungkin ledakan akan terjadi karena penyalaan yang tidak tepat waktu. Demikian juga jika LPG tidak juga menyala oleh pemantik otomatis hingga campuran gas H_2 di tungku mencapai potensi meledak, maka letikan api penyalaan LPG tersebut menjadi pemicu ledakan di ruang bakar.

Untuk mencegah terjadinya ledakan tersebut, maka jika api LPG padam pemantik otomatis hanya bekerja dalam interval waktu tertentu (menggunakan *timer* yang dapat diatur, untuk ME-11 diatur 7 detik). Jika dalam interval waktu tersebut nyala api tidak juga terjadi, maka operasi reduksi dihentikan secara *emergency*, yaitu katup keluar dan masuk tungku ditutup dan

sistem tungku di istirahatkan. Proses selanjutnya mengikuti prosedur pengosongan gas dalam tungku akibat proses berhenti secara *emergency* yang dijelaskan di [3].

Aliran Gas Buang Tinggi

Potensi terjadinya ledakan akibat aliran gas buang tinggi mungkin terjadi di ruang bakar gas buang. Kondisi ini bisa terjadi karena *setting* masuknya gas H_2 ke tungku tinggi (②), atau tekanan di ruang tungku tinggi (③), sehingga aliran gas keluar tungku juga tinggi.

Tingginya aliran gas keluar tungku akan berpotensi membentuk komposisi gas H_2 berpotensi meledak di ruang bakar. Kondisi ini dapat dianalogikan dengan simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 3. Api LPG atau letikan pemantik penyalaan LPG akan menjadi pemicu ledakan jika komposisi volume berpotensi meledak terjadi.

Untuk mencegah hal ini, sistem pengendali laju aliran gas buang digunakan, yaitu laju aliran gas buang dibatasi. Jika aliran gas buang terlalu tinggi maka katup masuk gas ke ruang tungku (SH atau SN pada Gambar 6) ditutup, dan dibuka jika laju aliran telah kembali pada daerah yang diperbolehkan.

SIMPULAN

FTA potensi terjadinya ledakan pada sistem tungku reduksi ME-11 telah dibuat untuk dua tempat kejadian, di ruang tungku dan di ruang bakar gas buang. Proses reduksi dengan ME-11 tidak menggunakan gas hidrogen bertekanan tinggi maka kemungkinan ledakan di ruang bakar tidak akan tinggi karena juga volume gas H_2 di ruang bakar tersebut tidak akan terlalu besar. Sementara itu ledakan di ruang tungku juga tidak mudah terjadi karena pemicu ledakan hanya berasal dari *self-combution* dari gas H_2 yang secara prosedur

dapat dihindari bertemunya dengan komposisi gas yang berpotensi meledak. Teknik redundancy diterapkan pada sistem instrumentasi ME-11 terhadap tindakan operator untuk meningkatkan faktor keselamatan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sangat berterima kasih kepada saudara Zaidi, Djoko Kisworo, Triarjo, dan Dedi Haryadi staf Bidang Bahan Bakar Nuklir, Kelompok Proses Konversi dan Fabrikasi Bahan Bakar Nuklir – PTBN BATAN, atas bantuan teknis-nya selama kegiatan instalasi dan percobaan berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Astbury Gr. dan Hawksworth Sj, (2007), *Spontaneous Ignition of Hydrogen Leaks: A review of Postulated Mechanisms.*, International Journal of Hydrogen Energy, 32, pp. 2178-2185.
- [2]. Anonim, (n,d), <http://h2incidents.org/incident.asp?inc=58> dibaca: 18 Juni 2012.
- [3]. Suntoro A, (2009), *Sistem Operasi Tungku Reduksi ME-11 Menggunakan Kendali Logik Tambahan*, Prosiding Seminar Nasional Daur Bahan Bakar, Serpong, Oktober 2009.
- [4]. Suntoro A, (2007), *Metodologi Kendali Logik Tambahan Pada Sistem Tungku Reduksi ME-11.*, Seminar Nasional III SDM Teknologi Nuklir. Yogyakarta.
- [5]. Langenati R, Ngatijo, Windaryati L, Mustika D dan Mahpudin., (2008), *Studi Awal Oksidasi Gagal Pelet Sinter UO₂.* Seminar Hasil-hasil Penelitian EBN 2007., Serpong.
- [6]. Dammunir, (2007), *Aspek Kinetika Reaksi Kernel U₃O₈ dengan Gas H₂ Terhadap Karakteristik Energi Aktivasi, Konstanta Laju Reaksi dan Rasio O/U Kernel UO₂.* Jurnal Teknologi Bahan Nuklir, Vol. 3, No. 2.
- [7]. ES & H Manual, Volume II, Part 18, Document 18.4 Hydrogen, Revision 3, January 12, 2006.
- [8]. Los Alamos National Laboratory, Hydrogen Safety, Doc. No: ESH13-401-sb-8/00.
- [9]. Venetsanos Ag dan Bartzis Jg, (2005), *CFD Modelling Of Large-Scale LH2 Spills in Open Environment.*, International Conference on Hydrogen Safety, HySafe ICHG, Pisa, Italy.
- [10]. Kebler A, Ehrhardt W dan Langer G, (2005), *Hydrogen Detection: Visualisation of Hydrogen Using Non Invasive Optical Schlieren Technique BOS.*, International Conference on Hydrogen Safety, HySafe ICHG, Pisa, Italy.
- [11]. Gerogiannis Vc., Caragiannisie, dan Tsoukarellas Ma.,(1997), *A General Framework for Applying Safety to Safety Critical Real-Time Applications Using Fault Tree.*, IEEE I.
- [12]. Vesely We, Goldberg Ff, Roberts Nh dan Haasl Df., (1981), *Fault Tree Handbook.*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DF.