

ANALISIS PEMBANGKITAN GAS H₂ DI KOLAM PENYIMPAN BAHAN BAKAR BEKAS, ISFSF.

Endang Susilowati,
Pudjiyanto MS, Kadarusmanto.

INTISARI

Analisis Pembangkitan Gas H₂ Di Kolam Penyimpanan Bahan Bakar Bekas, ISFSF. Gas H₂ merupakan gas yang mudah terbakar dan meledak, sehingga keberadaannya perlu dianalisis dan ditekan serendah mungkin. Dalam penelitian ini telah dianalisis laju gas H₂ terbangkit di kolam penyimpanan bahan bakar bekas, ISFSF selama periode penyimpanan. Analisis dilakukan dengan menghitung laju energi β dan γ yang dibangkitkan oleh bahan bakar kemudian ditentukan besarnya energi (banyaknya partikel β dan photon γ) yang diserap oleh air. Diasumsikan seluruh energi yang diserap digunakan untuk menghidrolisa air. Dengan mengetahui faktor pembentukan gas H₂, dapat dihitung banyaknya gas H₂ yang dibangkitkan, yaitu sebesar 12,06 l/jam. Sedang banyaknya gas H₂ yang dibangkitkan di wadah bahan bakar bekas cacat adalah 0,46 l/jam. Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa kecepatan pembentukan gas H₂ di kolam penyimpanan adalah masih dalam tingkat yang tidak mengkhawatirkan. Sebaliknya dalam hal wadah bahan bakar cacat, antisipasi kenaikan tekanan harus diintegrasikan di dalam perhitungan desain..

Abstract

The Generation of Hydrogen Gas In The Interim Storage For Spent Fuel Pool. Hydrogen is an combustible and explosive gas therefore the magnitute of that gas is needed to be analize and keep as low as possible. The research in according with the generation of hydrogen gas in the interim storage for spent fuel has been done. The analysis is implemented by calculating β and γ generated by spent fuel and then it is determined the magnitute of β and γ energy abrorbed by cooling water. It is assumed that absorbed energy is used to hydrolize the water. The amount of hydrogen depending on the its generating factor. The generated hydrogen both in the interim storage and in the damage can are 12,06 l/hour and 0,46 l/hour. Hence, it can be concluded that generation of hydrogen gas is not warrant of the safe operation for spent fuel pool. In contrast, the pressure increase in the defect fuel can should be anticipated during design process.

PENDAHULUAN

Interim Storage For Spent Fuel (ISFSF) adalah fasilitas kolam penyimpanan bahan bakar bekas yang dipasok oleh AEA Engineering, United Kingdom, dengan ukuran 5m x 14m x 6,5m, dan terletak diantara gedung Instalasi Radio Metalurgi dan gedung reaktor GA. Siwabessy. Fasilitas ini mempunyai kapasitas penyimpanan sebanyak 1436 perangkat bakar bekas ditambah beberapa rak penyimpanan untuk menampung *scrab* teriradiasi yang berasal dari pusat lain¹⁾. Bahan bakar bekas yang disimpan adalah bahan bakar bekas jenis MTR tipe plat yang telah dipakai untuk operasi teras reaktor GA.

Siwabessy, dan telah mengalami pendinginan pendahuluan minimum selama 100 hari.

Selama periode penyimpanan, produk fisi yang terdapat di dalam bahan bakar bekas akan mengeluarkan partikel bermuatan α dan β , serta gelombang elektromagnetik γ yang akan berinteraksi dengan materi di sekitarnya. Dalam hal materi tersebut adalah air, maka akan terjadi peristiwa penguraian air menjadi ion-ionnya, pembentukan radikal-radikal bebas dan juga produk molekuler. Reaksi ini merupakan reaksi yang dapat balik dan hasil reaksinya sangat dipengaruhi oleh adanya zat pengotor dan O₂ yang terlarut di dalam air. Dalam lingkungan air

yang murni dengan konduktivitas $< 5\mu\text{S/cm}$, kebolehjadian reaksi ini adalah sangat kecil.

Salah satu hasil peruraian tersebut adalah gas H_2 , banyaknya gas H_2 yang dibangkitkan perlu diwaspadai, dianalisis dan ditekan serendah mungkin. Karena gas H_2 adalah gas yang mudah terbakar dan mudah meledak. Menurut penelitian yang dilaksanakan oleh Douglas W. Stams dan Marshall Berman²⁾, menyebutkan bahwa pada konsentrasi gas H_2 sebesar 4% terhadap volume udara sekitar, maka proses pembakaran H_2 akan terjadi apabila ada sumber penyalaan.

Berdasar pada informasi diatas, di dalam tulisan ini telah dikupas dan dianalisis besarnya pembangkitan gas H_2 selama periode penyimpanan., dengan mempertimbangkan kondisi terburuk yang mungkin terjadi, yaitu bahwa air pendingin tidak murni sehingga proses pembentukan gas H_2 terjadi pada kecepatan maksimum. Analisis kemudian dikaitkan dengan bekerjanya sistim ventilasi. Dalam hal sistim ventilasi tidak berfungsi, dalam kurun waktu berapa lama sistim tersebut harus aktif kembali untuk menghindari menumpuknya gas H_2 sehingga dapat mencapai konsentrasi kritis pembakaran.

Dasar pemikiran kondisi terburuk ini bertitik tolak kepada persyaratan pengkajian keselamatan yang harus dilaksanakan oleh setiap pemegang ijin instalasi nuklir dalam mengajukan ijin operasinya.

Analisis dilakukan dengan cara menghitung besarnya laju energi β dan γ yang dibangkitkan oleh unsur-unsur yang terkandung di dalam bahan bakar bekas, terutama adalah unsur produk fisi. Perhitungan dilakukan dengan bantuan paket program ORIGEN2³⁾. Tahap selanjutnya berdasar kepada data geometri dan

material rak penyimpanan beserta sifat-sifat radiologis dari partikel bermuatan β dan gelombang elektromagnetik γ , kemudian ditentukan fraksi dari partikel β dan photon γ yang diserap oleh air. Dengan mengetahui faktor pembentukan gas H_2 selama terjadinya peristiwa peruraian⁴⁾, maka banyaknya gas H_2 yang dibangkitkan per satuan waktu dapat diketahui. Selain hal tersebut diatas, di dalam tulisan ini telah dihitung juga banyaknya gas H_2 yang ditimbulkan di dalam wadah bahan bakar bekas cacat. Karena banyaknya gas yang ditimbulkan akan berpengaruh terhadap kenaikan tekanan wadah

Hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai inputan terhadap laporan analisis keselamatan fasilitas ISFSF, yang mana dokumen ini merupakan dokumen perijinan yang harus dipunyai oleh setiap pemegang ijin.

LANDASAN TEORI

Interaksi radiasi dengan materi

Bahan bakar bekas mengandung sejumlah unsur, terutama adalah produk fisi, yang di dalam masa peluruhannya memancarkan partikel-partikel bermuatan (α dan β) dan juga gelombang elektromagnetik (photon γ). Partikel bermuatan dan photon γ akan berinteraksi dengan materi yang ditumbuknya, sehingga menimbulkan peristiwa eksitasi dan ionisasi dan juga pembentukan radikal-radikal bebas. Sementara itu partikel dan photon γ kehilangan sebagian energinya.

Mekanisme penyerapan partikel β , dijelaskan menurut interaksi medan coulomb partikel bermuatan dengan elektron materi. Semua partikel bermuatan ketika melewati suatu materi akan kehilangan sebagian energinya melalui dua peristiwa yaitu tumbukan dengan

elektron orbital materi dan pancaran radiasi (sinar x) apabila partikel mendekati inti atom materi. Ketika partikel bergerak mendekati inti atom, kecepatannya akan berubah yaitu dipercepat atau diperlambat. Peristiwa ini akan menghasilkan suatu pancaran radiasi yang dinamakan *bremstrahlung*. Kehilangan energi karena *bremstrahlung* hanya terjadi apabila energi partikel $\beta > 1$ Mev dan materi yang ditumbuknya mempunyai nomor atom yang tinggi⁴⁾. Apabila materi yang ditumbuknya bernomor atom rendah, < 90 , dan energi $\beta < 1$ Mev, maka dianggap hanya peristiwa tumbukan saja yang terjadi.

Banyaknya energi partikel yang hilang karena tumbukan dijabarkan menurut persamaan Bethe sebagai berikut ⁴⁾

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2} NZ \left\{ \frac{\ln 2m_e v^2}{I} - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right\}$$

dE/dx = kehilangan energi/ satuan panjang

e = muatan partikel = $4,8 \times 10^{-10}$ esu

v = kecepatan partikel cm/dt

m_e = massa elektron = $9,11 \times 10^{-28}$ g

N = jumlah atom materi/cm³

= $L\rho/A$, dimana L , ρ dan A masing-masing adalah bilangan Avogadro, densitas dan berat atom materi

Z = nomor atom materi

I = energi rata-rata eksitasi dan ionisasi materi = 30 ev untuk semua atom

β = v/c , perbandingan kecepatan partikel terhadap udara

Persamaan diatas dapat disederhanakan karena $2m_e v^2$ hampir tidak tergantung kepada harga v , sehingga persamaan menjadi :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{Mz^2}{E}$$

M dan E adalah massa dan energi partikel.

Kebolehjadian tumbukan antara partikel β dengan materi ditentukan oleh jangkauan (R). Apakah jarak R cukup untuk dapat berkontak dengan materi. Harga dari R ini ditentukan oleh energinya. Pada umumnya jangkauan partikel β dinyatakan dalam satuan kerapatan permukaan, g/cm². Untuk energi majemuk hubungan antara jangkauan dan energi diturunkan menurut persamaan empiris sebagai berikut⁴⁾

$$R = 0,407 E^{1,38} \text{ g/cm}^2 \quad 0,15 < E_{\text{maks}} < 0,8 \text{ Mev}$$

$$R = (0,542 E_{\text{maks}} - 0,133) \text{ g/cm}^2, \quad E_{\text{maks}} > 0,8 \text{ Mev}$$

Untuk partikel β energi tunggal dengan tingkat energi $> 0,2$ Mev, hubungan antara energi dan jangkauan diturunkan oleh persamaan empiris sebagai berikut ⁴⁾

$$R = 412 E_o^{1,265-0,09521 \ln E_o} \quad , E_o < 2,5 \text{ Mev}$$

$$R = 530 E_o - 106 \quad , E_o > 2,5 \text{ Mev}$$

Tetapi lazimnya partikel β mempunyai bentuk energi yang kontinyu. Sedangkan R rata-rata dari semua unsur produk fisi diperoleh dengan menggunakan persamaan dibawah ⁵⁾ :

$$R = \sum R \frac{A_i}{A}$$

R, R_i = jangkauan rata-rata, jangkauan unsur i

A, A_i = aktivitas total, aktivitas unsur i

Jumlah partikel β setelah menembus suatu ketebalan materi akan berkurang secara eksponensial seperti diturunkan oleh persamaan dibawah ⁴⁾

$$N_x = N_0 e^{-\mu x}$$

N_x dan N_0 adalah jumlah partikel β setelah dan sebelum menembus materi. Sedangkan μ dan x masing-masing adalah tebal materi (cm) dan konstantan penyerapan (1/cm).

Karena jangkauan hampir tidak tergantung kepada jenis materi, maka μ/ρ (konstanta penyerapan massa), tidak tergantung kepada berat atom materi⁴⁾.

$$\mu/\rho \approx 17 E_{\text{maks}}^{-1,43} \text{ cm}^2/\text{gram}$$

sehingga persamaan menjadi :

$$N_x = N_0 e^{-\mu/\rho x}$$

Tidak seperti partikel bermuatan yang kehilangan sebagian energinya sewaktu menumbuk materi, photon γ tidak mempunyai jangkauan yang spesifik, dan sebagai gantinya adalah faktor atenuasi yang diekspresikan sebagai *half thickness* photon γ . Photon γ berinteraksi dengan materi, menganut 4 model reaksi; efek photolistrik, hamburan compton, produksi pasangan dan reaksi nuklir. Model reaksi mana yang dianut tergantung kepada grup energinya. Efek photolistrik berlaku untuk energi 0,1 -100keV, hamburan compton untuk energi 0,1 -10 MeV, produksi pasangan untuk energi diatas 10 MeV. Sedangkan reaksi nuklir hanya terjadi pada photon γ dengan energi yang sangat tinggi.

Proses berkurangnya intensitas photon γ , didekati menggunakan persamaan :

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

I dan I_0 =intensitas photon γ sesudah dan sebelum berinteraksi dengan materi MeV
 d = tebal materi cm
 μ = koefisien penyerapan linier 1/cm

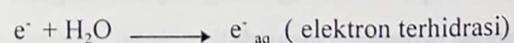
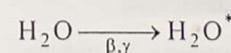
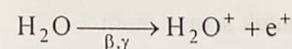
Dalam bentuk penurunan energi persamaannya adalah :

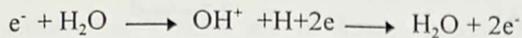
$$E = E_0 e^{-\frac{\mu d}{\rho}}$$

μ/ρ = koefisien absorpsi massa

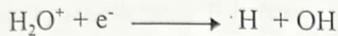
Proses Radiolisa

Partikel β dan photon γ akan berinteraksi dengan air pendingin, sehingga terjadi peristiwa radiolisa air. Proses ini sangat kompleks karena melibatkan berbagai hasil *intermediate* yang sebagian diantaranya merupakan *precursor* terhadap hasil akhir. Meskipun begitu hasil utama dari proses radiolisa air adalah radikal-radikal bebas .H, elektron terhidrasi (e^-_{aq}), .OH, .OH₂, ion positio H₂O⁺ dan produk molekuler H₂ dan H₂O₂ ⁴⁾. Proses radiolisa air dijabarkan menurut persamaan reaksi dibawah :





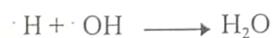
Produk ionik ini berumur sangat pendek dan cepat bergabung membentuk radikal bebas⁴⁾.



Dengan adanya O_2 terlarut, radikal $\cdot H$ akan bereaksi membentuk $\cdot OH_2$, yang pada tahap lanjut membentuk molekul H_2O_2 .



Disamping itu elektron terhidrasi, seperti ditunjukkan pada reaksi tersebut diatas dapat bereaksi dengan melepaskan H_2 . Dalam air murni reaksinya adalah sangat lambat. Reaksi dipercepat dengan adanya zat pengotor⁵⁾. Zat pengotor ini juga akan mempercepat reaksi antar radikal bebas.



Faktor lain yang mempengaruhi proses radiolisa adalah LET (*linier energy transfer*), yaitu suatu harga yang menyatakan penurunan kecepatan energi per satuan panjang materi yang dilewati oleh partikel. Harga LET dijabarkan seperti persamaan Bethe diatas. Harga ini bervariasi terhadap jenis radiasi dan energinya. Partikel β dan photon γ mempunyai LET < partikel α .

Harga kuantitatif dari setiap hasil radiolisa ditentukan oleh faktor G, yang diartikan sebagai banyaknya molekul/spesi yang terbentuk atau terurai akibat penyerapan energi sebesar 100 ev⁶⁾. Harga G untuk H_2 yang terbentuk dari proses radiolisa air dengan LET rendah (LET untuk partikel β dan photon γ) adalah 0,42⁷⁾.

Dengan mengetahui banyaknya gas H_2 yang terbentuk persatuan waktu, maka hasil perhitungan ini dapat digunakan sebagai dasar pemikiran untuk menganalisis aspek keselamatan fasilitas.

PERHITUNGAN :

1. Pembentukan H_2 di kolam penyimpanan

a. Fraksi partikel β yang diserap oleh air .

Jumlah partikel β setelah melewati kelongsong bahan bakar Al setebal 0,38mm, akan berkurang menurut persamaan berikut:

$$N_x = N_0 e^{-\mu x}$$

$$\mu / \rho \approx 17 E_{maks}^{-1,43}$$

Untuk memperoleh harga E_{maks} dari seluruh partikel β yang dipancarkan oleh semua produk fisi (pemancar β) adalah sebagai berikut :

$$E_{maks} = \sum A_i E_{maks i} / A$$

Dengan menggunakan data yang tertuang di dalam tabel 1, diperoleh harga E_{maks} adalah = 1,2 Mev., maka diperoleh harga $\mu / \rho = 13,09 \text{ cm}^2/\text{g}$. Untuk ρ kelongsong Al = 2,7 g/cm^3 , $\mu = 35,36 / \text{cm}$

Tabel 1. Hubungan antara aktivitas, energi dan jangkauan partikel β yang terdapat dalam produk fisi elemen bakar bekas.

Unsur	Aktivitas Curi	Energi β Mev	Emaks Mev	Jangkauan g/cm^2
Kr	51,67	0,246	0,738	0,058
Sr	5315	0,386	1,158	0,109
Y	7656	0,606	1,818	0,204
Zr	8684	0,119	0,357	0,022
Nb	15060	0,471	1,413	0,144
Ru	2810	0,01	0,03	0,0007
Rh	2593	0,791	2,373	0,29
Sb	20,51	0,086	0,258	0,014
Te	155,7	0,059	0,177	0,008
Cs	5637	0,157	0,471	0,32
Ba	494,4	0,276	0,828	0,069
Ce	11460	0,146	0,438	0,029
Pm	1387	0,062	0,186	0,002
Pr	8989	0,936	2,808	0,371

$$N_x = N_0 e^{-\mu x}$$

N_x (jumlah partikel β setelah menembus kelongsong) = 0,26 N_0 . Laju energi β sebanding dengan jumlah partikel β yang membawanya, sehingga laju energi $\beta = 0,26 E_0$

Sedangkan untuk menghitung jangkauan rata-ratanya adalah menggunakan data aktifitas dan jangkauan masing-masing unsur seperti yang tertulis di tabel 1 pula.

$$R = \sum R_i A_i/A$$

R, R_i = jangkauan rata-rata, jangkauan unsur i

A_i, A = aktivitas unsur i , aktivitas total

$$R = 0,14 \text{ g/cm}^2 = 140 \text{ mg/cm}^2$$

Ketebalan kelongsong = 0,038 cm

$$\rho_{Al} = 2,7 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Ketebalan kelongsong "d"} = (0,038 \text{ cm})(2,7 \text{ g/cm}^3) = 0,1 \text{ g/cm}^2.$$

Karena jangkauan partikel $\beta >$ ketebalan materi kelongsong, maka fenomena ini memberikan suatu pengertian bahwa partikel β yang dipancarkan mendekati garis normal akan berhasil menembus kelongsong dan berkontak dengan air. Sedang partikel β yang dipancarkan menjauhi garis normal akan membutuhkan jarak yang lebih jauh untuk berkontak dengan air. Karena jarak yang ditempuh partikel ini $>$ jangkauan, partikel ini tidak berkesempatan berkontak dengan air. Dengan dasar seperti ini, dianggap hanya 1/3 dari partikel β yang berkontak dengan air¹⁾

b. Fraksi photon γ yang diserap oleh air.

Perhitungan di dasarkan dengan menggunakan model sebagai berikut :

Bahan bakar bekas ditempatkan di dalam suatu tabung penyimpan yang terbuat dari stainless steel, seperti yang tertera pada gambar 1.

$$\text{Diameter dalam tabung} = 127,2 \text{ mm}$$

$$\text{Tebal plat bahan bakar} = 1,3 \text{ mm}$$

$$\text{Tebal kelongsong} = 0,38 \text{ mm}$$

$$\text{Jarak antar plat bahan bakar} = 2,55 \text{ mm}$$

$$\text{Jumlah plat /bahan bakar} = 21$$

$$\text{Jarak bahan bakar ke dinding tabung} = 24,45 \text{ mm}$$

Harga μ , ρ dan d untuk aluminium, air dan stainless steel ditunjukkan pada tabel 2.

Photon γ akan berinteraksi dengan air di anulus setelah menembus kelongsong dan juga akan

berinteraksi dengan air di kolam penyimpan setelah menembus dinding tabung yang terbuat dari stainless steel. Dengan menggunakan persamaan penyerapan energi dapat dihitung sisa energi γ setelah menembus berbagai lapisan materi.

$E_{\gamma -1}$, energi γ setelah menembus kelongsong aluminium = $0,99E_0$

$E_{\gamma -2}$, energi γ setelah menembus air dalam anulus = $0,84$

$E_{\gamma -3}$, energi γ setelah menembus stainless steel = $0,71$

Diasumsikan bahwa semua energi γ yang sisa diserap oleh air di dalam kolam. Total energi γ yang diserap (termasuk yang diserap oleh air di dalam anulus) adalah sebesar $0,87$.

Persamaan penyerapan energi γ oleh suatu materi, diturunkan menurut persamaan,

$$E = E_0 e^{-\mu d/\rho}$$

E_0 = energi awal Mev

E = sisa energi setelah menembus materi dengan ketebalan d Mev

μ = koefisien penyerapan linier 1/cm

ρ = densitas materi g/cm³

d = koefisien penyerapan g/cm²

Tabel 2.

materi	μ cm ⁻¹	ρ g/cm ³	d g/cm ⁻²
aluminium	0,1873	2,7	0,1026
air	0,0693	1,0	2,445
stainless steel	0,495	7	3,36

c. Total laju energi β yang dibangkitkan di dalam kolam

Perhitungan dilaksanakan dengan bantuan paket program ORIGEN2. Keluaran dari ORIGEN2 tidak secara langsung menghitung besarnya laju energi β yang dipancarkan oleh setiap unsur yang terdapat di dalam bahan bakar bekas. Tetapi dari salah satu keluaran ORIGEN2, yaitu besarnya radioaktivitas, yang berasal dari unsur pemancar β dapat diacu untuk menghitung besarnya laju energi β yang ditimbulkan.

$$\text{energi } \beta \text{ (Mev/dt)} = \text{radioaktivitas (dis/dt)} \times \text{energi } \beta \text{ rata}^2 \text{ (Mev/dis)}$$

Hasil perhitungan ditunjukkan pada tabel 3 dan 4 serta gambar 2. Tabel 3 menampilkan masing-masing laju energi β dan energi γ sebagai fungsi dari waktu peluruhan dari 100 hari s/d 7300 hari (20 tahun). Selanjutnya dari tabel 4 dapat dihitung total energi β yang dibangkitkan per bahan bakar pada interval waktu peluruhan 100 hari s/d 9225 hari, yaitu sebesar $2,31 \times 10^{17}$ Mev dt⁻¹ bahan bakar⁻¹ hari.

Catatan : Waktu peluruhan dihitung untuk kurun waktu 9225 hari, karena antara waktu peluruhan dan waktu penyimpanan di kolam ISFSF ada perbedaan waktu 100 hari. Data energi β setelah masa peluruhan 7300 adalah hasil ekstrapolasi.

Diasumsikan jumlah bahan bakar yang disimpan selama 25 tahun adalah 1400 bahan bakar. Secara matematis, 1 hari = $1400/9125$ bahan bakar = $0,153$ bahan bakar.

Total energi β yang dibangkitkan,
 $= (2,31 \times 10^{17} \text{ Mev dt}^{-1} \text{ bahan bakar}^{-1} \text{ hari})(0,153$
 $\text{ b.bakar hari}^{-1}) / 6,25 \times 10^{12} \text{ Mev dt}^{-1} \text{ W}^{-1}$
 $= 5630 \text{ Watt}$

Energi β yang diserap oleh air $= 0,33 \times 0,26 \times$
 $5630 \text{ Watt} = 483,05 \text{ Watt}$

d. Total laju energi γ yang dibangkitkan di dalam kolam.

Besarnya photon γ yang dipancarkan dapat langsung dihitung dengan paket program ORIGEN2. Seperti pada perhitungan energi β , tabel 3 dan 5 adalah merupakan hasil perhitungan energi γ sebagai fungsi dari waktu peluruhan dari 100 hari s/d 7300 hari (20 tahun). Tabel 5 menguraikan total energi γ yang dibangkitkan pada interval waktu 100 hari s/d 9225 hari masa peluruhan.

Total energi $\gamma = (1,39 \times 10^{17} \text{ Mev dt}^{-1} \text{ bahan}$
 $\text{ bakar}^{-1} \text{ hari})(0,153 \text{ b.bakar hari}^{-1}) /$
 $6,25 \times 10^{12} \text{ Mev dt}^{-1} \text{ Watt}^{-1}$
 $= 3402,72 \text{ Watt}$

energi γ yang diserap $= 0,87 \times 3402,72 \text{ Watt} =$
 $2960,36 \text{ Watt}$

e. Kecepatan pembentukan H_2 di kolam penyimpanan

$f = G(\text{H}_2) \times 6,25 \times 10^{18} \text{ ev/J} \times E \times 22,4 \text{ l/mol}$
 $\times 3600 \text{ dt/jam} / 100 \text{ A}$

$f = \text{kecepatan } \text{H}_2 \text{ terbentuk l/jam}$

$G(\text{H}_2) = \text{faktor pembentukan } \text{H}_2 / 100 \text{ eV}$
 $= 0,45 \text{ molecules} / 100 \text{ eV}$

$A = \text{bilangan avogadro}$
 $= 6,02 \times 10^{23} \text{ molecules/mol}$

$E = \text{kecepatan penyerapan energi oleh air}$
 $= (483,05 + 2960,36) \text{ Watt}$
 $= 3443,4 \text{ Watt}$

Dari persamaan diatas diperoleh bahwa besarnya H_2 yang terbentuk, $f = 12,06 \text{ l/jam}$

2. Pembentukan gas H_2 di wadah bahan bakar bekas cacat

Untuk perhitungan ini diasumsikan bahwa bahan bakar bekas yang mengalami kegagalan (cacat), ditempatkan dalam wadah yang khusus yang berbentuk silinder dengan ukuran diameter dalam $= 120 \text{ mm}$ dan tinggi 40 mm , disimpan selama 365 hari atau 465 hari waktu peluruhan. Kemudian selama waktu tersebut dihitung banyaknya gas H_2 yang dibangkitkan dan kenaikan tekanan di dalam wadah akibat pembangkitan gas H_2 .

a. Laju energi β dan γ yang dibangkitkan oleh bahan bakar bekas

Dengan menggunakan tabel 3 dan 4 diperoleh,
 total energi $\beta = \frac{6,65 \times 10^{15} \text{ Mev dt}^{-1}}{6,25 \times 10^{12} \text{ Mev dt}^{-1} \text{ Watt}^{-1}}$
 $= 105,6 \text{ Watt}$

total energi $\gamma = \frac{7,26 \times 10^{15} \text{ Mev dt}^{-1}}{6,25 \times 10^{12} \text{ Mev dt}^{-1} \text{ Watt}^{-1}}$
 $= 116,16 \text{ Watt}$

b. Kecepatan penyerapan partikel β oleh air.

Jangkauan $0,4 \text{ Mev}$ partikel β di dalam aluminium adalah $0,14 \text{ g/cm}^2$. Tebal kelongsong $0,38 \text{ mm}$. Partikel β akan dipancarkan kesegala arah, sehingga hanya partikel β yang mendekati garis normal dan berhasil menembus ketebalan kelongsong dapat berkontak dengan air. Dengan pengertian seperti

ini, dianggap partikel β yang berkontak dengan air adalah 1/3 bagian.

Analog dengan butir 1, energi yang diserap = $0,33 \times 0,26 \times 105,6 \text{ Watt} = 9,06 \text{ Watt}$

c. Kecepatan penyerapan photon γ oleh air

Dari hasil perhitungan dengan ORIGEN2, diamati bahwa energi photon γ yang terbesar adalah di dalam tingkatan 0,575 - 0,875 Mev. Sesuai dengan disain wadah (gambar 3), diperoleh bahwa : tebal lapisan air antara bahan bakar ke dinding wadah adalah 20,85 mm. Tidak semua photon γ dipancarkan sejajar dengan garis normal, sehingga diasumsikan bahwa jarak rata-rata yang harus ditempuh adalah 2 x jarak yang sebenarnya.

Dengan menggunakan persamaan penyerapan energi, analog dengan butir 1., di dapat bahwa energi γ yang berkontak dengan air adalah 0,99 energi awal. Dianggap semua energi ini diserap oleh air.

Energi yang diserap = $0,99 \times 116,16 \text{ Watt} = 115,43 \text{ Watt}$.

d. Kecepatan pembangkitan H_2 di wadah bahan bakar cacat.

Analog dengan butir 1., yaitu dengan menurunkan persamaan seperti dibawah

$$f = 0,009 \times G(H_2) \times E$$

$$E = 9,06 \text{ Watt} + 115,43 \text{ Watt} = 124,49 \text{ Watt}$$

$$G = 0,42$$

Gas H_2 yang terbentuk = $0,46 \text{ l/jam} = 0,02 \text{ mol/jam}$

e. Kenaikan tekanan wadah

Dengan mengasumsikan bahwa H_2 adalah gas ideal, maka berlaku rumus ,

$$PV = nRT$$

V = volume wadah

$$= 3,14 \times 60^2 \times 40 \text{ mm}^3 = 4,5 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$= 4,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

R = konstanta gas = $8,3 \text{ J/mol K}$

T = 298°K

$$P = \frac{0,02 \text{ mol} \times 298^\circ\text{K} \times 8,3 \text{ J/mol K}}{4,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3} =$$

$$4,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$= 10,99 \times 10^4 \text{ Pa} = 1,1 \text{ atm}$$

PEMBAHASAN

Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa :

1. Gas H_2 yang terbentuk di kolam penyimpan adalah 12,06 l/jam atau 289 l/hari (= $0,289 \text{ m}^3/\text{hari}$). Total volume udara disekitar kolam, dengan ukuran 29m x 9m x9m, adalah 2349 m^3 . Dengan adanya sumber penyalaan gas H_2 dapat terbakar apabila konsentrasinya mencapai 4% dari total volume udara sekitar yaitu sebesar $93,96 \text{ m}^3$ (~94 m^3). Waktu yang diperlukan untuk mencapai volume 4% adalah 325 hari.
2. Gas H_2 yang terbentuk di wadah bahan bakar bekas cacat adalah dengan kecepatan 0,46 l/jam atau 0,02 mol/jam. Jumlah ini memberikan kontribusi kenaikan tekanan sebesar 1,1 atm/jam. Jumlah ini adalah sangat berarti sehingga perlu diperhatikan kekuatan seal dan disain dari sistim ventilasi wadah.
3. Dengan mengambil asumsi pada kondisi yang terburuk, yaitu bahwa air pendingin tidak murni, sehingga proses peruraian air dan kecepatan pembentukan gas H_2 pada kecepatan yang maksimum ,ditunjukkan dengan faktor pembentukan H_2 sebesar $0,42^{(4)}$, ternyata laju pembentukan ini sangat

rendah apabila dibandingkan dengan volume udara di sekitarnya..

4. Dalam hal sistim ventilasi gagal, kurun waktu 325 hari, seperti disebutkan dalam butir 1 diatas, adalah waktu yang sangat panjang untuk mengadakan perbaikan
5. Perhitungan diatas didasarkan kepada asumsi yang konservatif, dalam artian masih terdapat ketidaktentuan dalam perhitungan dan perlu penelitian yang lebih rinci.

KESIMPULAN :

Berdasar pada hasil perhitungan dan pembahasan dapat ditarik suatu kesimpulan bahwa pembentukan gas H₂ di kolam penyimpanan adalah pada tingkat yang tidak mengkhawatirkan, dalam artian dalam kondisi yang terburuk kecepatan pembentukan adalah sangat rendah dan gas H₂ yang ditimbulkan dapat dihilangkan dengan sistim ventilasi. Sedangkan kenaikan tekanan di dalam wadah bahan bakar cacat harus diantisipasi di dalam disainnya.

DAFTAR PUSTAKA :

1. TRANSFER CHANNEL & ISFSF, PART 2, " Preliminary Safety Report", AEA Engineering UK
2. DOUGLAS W. and MARSHALL BREMAN, "High Temperature Hydrogen Combustion in Reactor Safety Application", Sandia National Laboratories, USA
3. ALLEN G CROFF, "A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code, ORNL/TM-7175
4. HARI JELVAS ARNIKER, "Essentials of Nuclear Chemistry", Wiley Eastern Limited.
5. WILLIAM J. PRICE, "Nuclear Radiation Detection", McGraw-Hill Book Company.
6. DRS. HARYOTO DOJOSUBROTO, " Dasar-dasar Radiokimia, Batan, Jakarta
7. JW.T. SPINKS and WOODS, " An Introduction to Radiation Chemistry" , John Willey and Sons.

Tabel 3. Energi β dan γ pada Kondisi waktu pendinginan 100 hari s/d 20 tahun

No.	Waktu Pendinginan (hari)	β -Energi/b.bakar Mev. x $10^{13}/dt$	Log β Energi	γ -Energi/b.bakar Mev. x $10^{13}/dt$	Log γ -Energi
1	100	80	14.9	74.79	14.87
2	365	18	14.25	7.06	13.85
3	730	8.3	13.92	1.77	13.25
4	1095	5	13.70	1.34	13.13
5	1460	3.5	13.54	1.14	13.06
6	1825	2.8	13.45	1.02	13.01
7	2190	2.4	13.38	0.94	12.97
8	2555	2.2	13.34	0.87	12.94
9	2920	2	13.3	0.84	12.92
10	3285	1.9	13.28	0.79	12.9
11	3650	1.8	13.26	0.76	12.88
12	4015	1.7	13.23	0.73	12.86
13	4380	1.67	13.22	0.71	12.85
14	4745	1.6	13.2	0.66	12.83
15	5110	1.56	13.19	0.64	12.82
16	5475	1.5	13.18	0.63	12.80
17	5840	1.46	13.16	0.62	12.79
18	6205	1.43	13.15	0.60	12.79
19	6570	1.38	13.14	0.57	12.75
20	6935	1.35	13.13	0.56	12.75
21	7300	1.33	13.12	0.54	12.74

Tabel 4. Energi β per bahan bakar pada kondisi waktu pendinginan 100 hari s/d 25 tahun
(100 hari s/d 9125 hari)

No	Selang waktu (hari)	Log energi β	energi β Mev. x $10^{13}/dt$	energi β x Selang waktu Mev. x $10^{15}/dt$
1	100 - 200	14.78	60.3	60.3
2	200 - 300	14.50	3.16	3.16
3	300 - 400	14.27	1.86	1.86
4	400 - 500	14.15	1.41	1.41
5	500 - 600	14.10	1.26	1.26
6	600 - 700	14.02	1.05	1.05
7	700 - 800	13.90	7.94	7.94
8	800 - 900	13.84	6.92	6.92
9	900 - 1000	13.76	5.75	5.75
10	1000 - 1500	13.62	4.17	20.85
11	1500 - 2000	13.45	2.82	14.1
12	2000 - 3000	13.35	2.24	20.24
13	3000 - 4000	13.25	1.78	17.8
14	4000 - 5000	13.2	1.58	15.8
15	5000 - 6000	13.1	1.26	12.6
16	6000 - 9225*	13.1	1.26	40,63
			Total	$2.31 \cdot 10^{17}$

* 9225 hari = 25 tahun + 100 hari

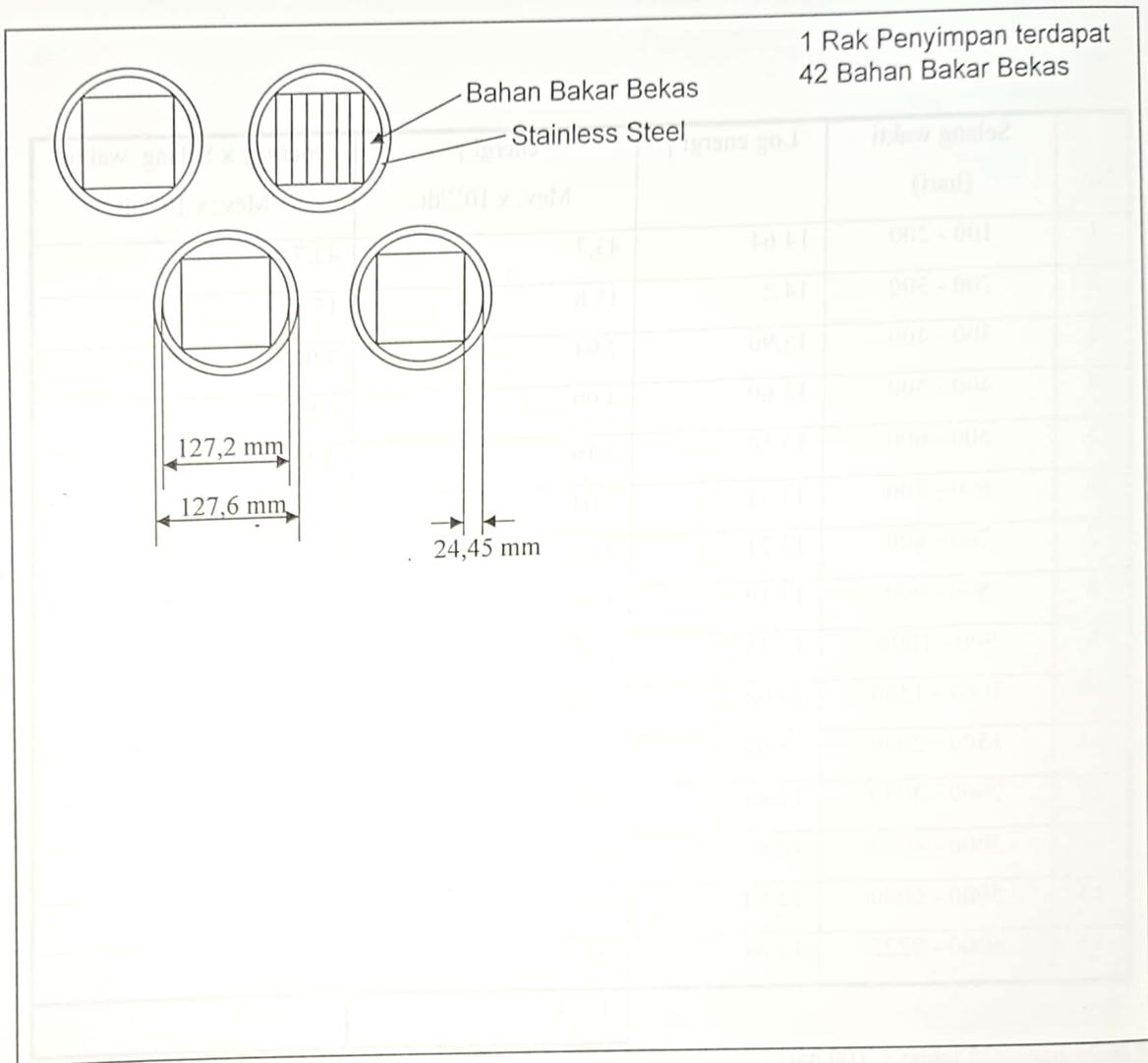
ditambah 100 hari karena 0hari waktu penyimpanan = 100 hari waktu peluruhan

**Tabel 5. Energi γ pada Kondisi waktu pendinginan 100 hari s/d 25 tahun
(100 hari s/d 9125 hari)**

No.	Selang waktu (hari)	Log energi γ	energi γ Mev. x $10^{13}/dt$	energi γ x Selang waktu Mev. x $10^{15}/dt$
1	100 - 200	14.64	43.7	43.7
2	200 - 300	14.2	15.8	15.8
3	300 - 400	13.90	7.94	7.94
4	400 - 500	13.69	4.90	4.90
5	500 - 600	13.50	3.16	3.16
6	600 - 700	13.31	2.04	2.04
7	700 - 800	13.21	1.62	1.62
8	800 - 900	13.19	1.55	1.55
9	900 - 1000	13.15	1.41	1.41
10	1000 - 1500	13.08	1.20	6
11	1500 - 2000	13.04	1.10	5.5
12	2000 - 3000	12.96	0.91	9.1
13	3000 - 4000	12.9	0.79	7.9
14	5000 - 6000	12.84	0.69	6.9
15	6000 - 9225	12.84	0.69	22,25
Total				1.39×10^{17}

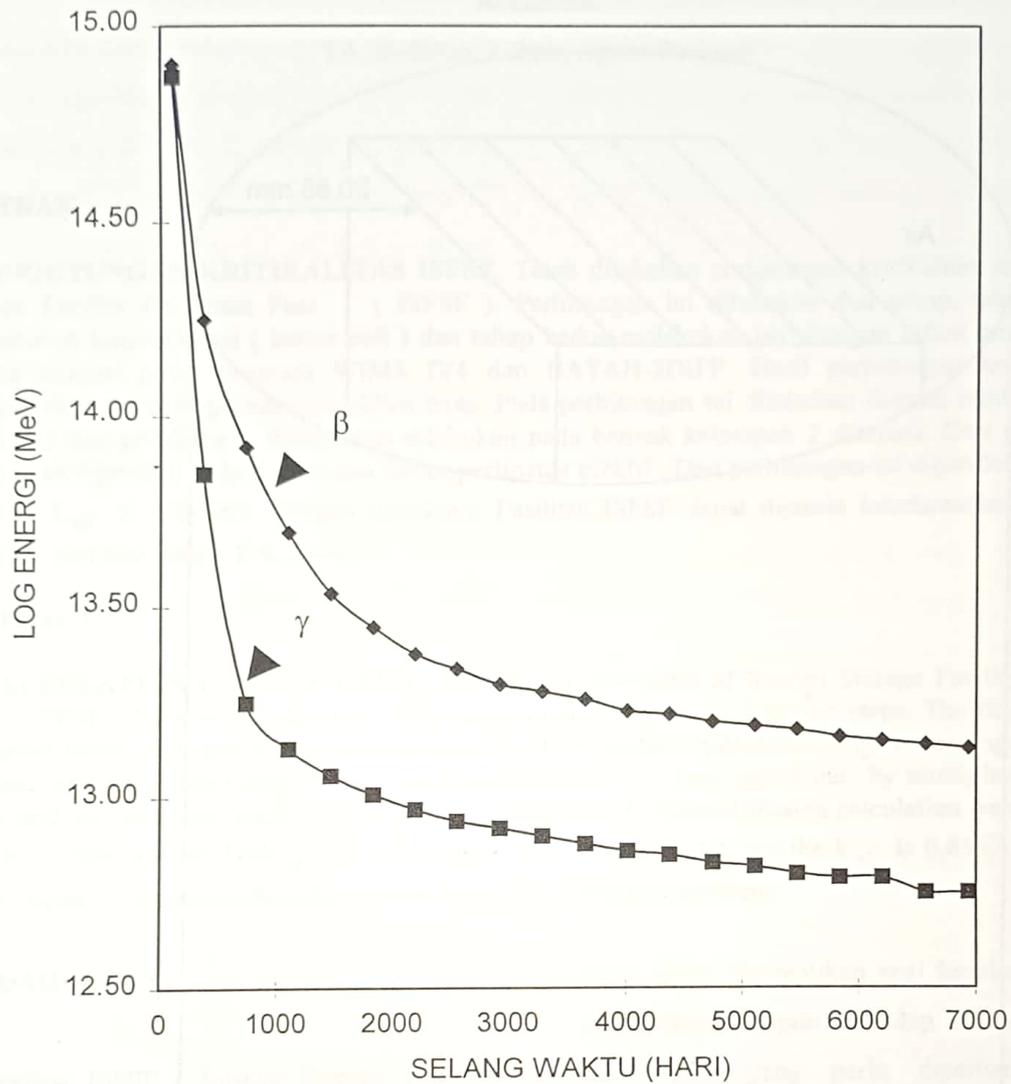
* 9225 hari = 25 tahun + 100 hari

Ditambah 100 hari karena 0hari waktu penyimpanan = 100 waktu peluruhan

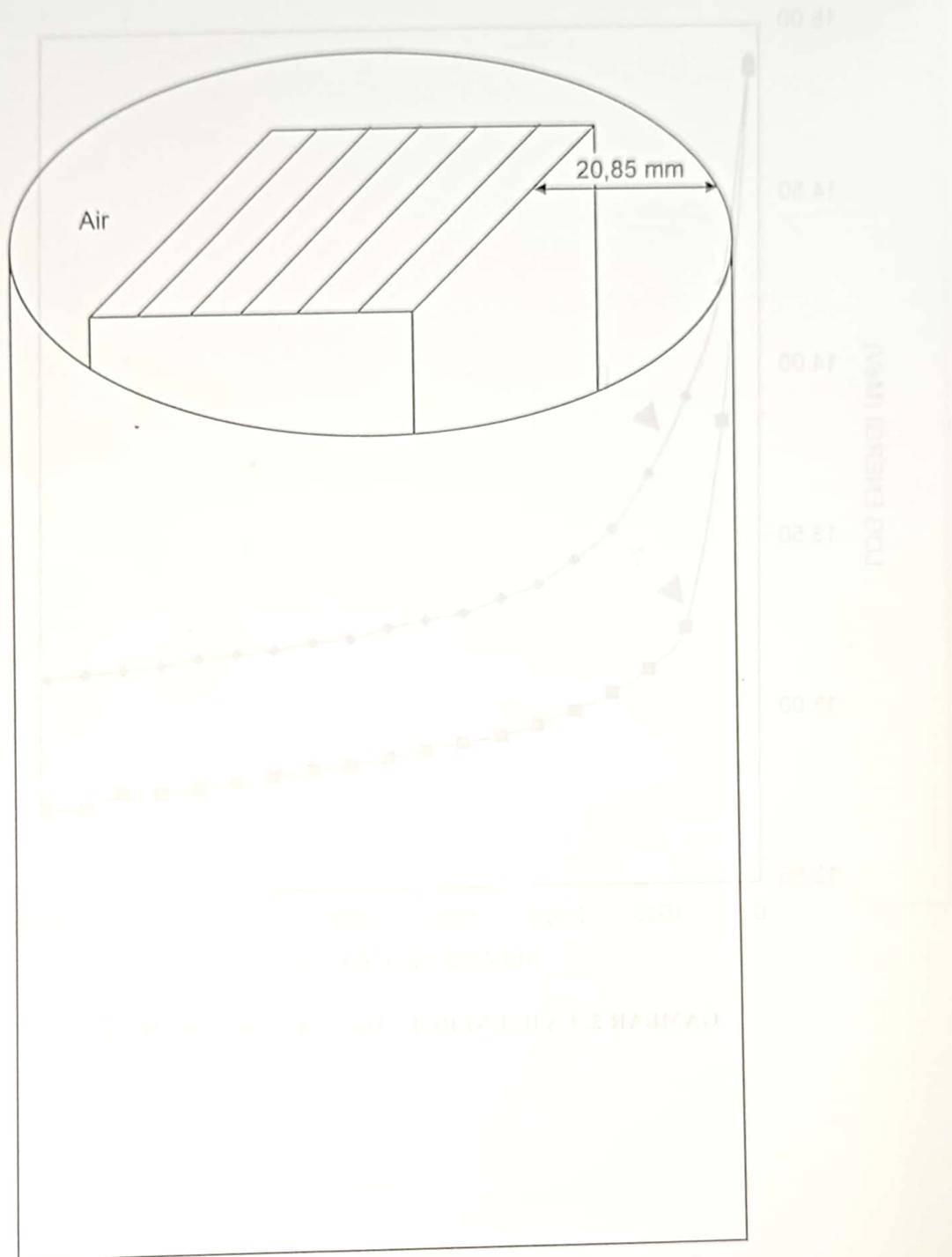


GAMBAR 1. UKURAN DAN POSISI BAHAN BAKAR BEKAS DI RAK

PERHITUNGAN KRITIKALITAS REAKSI



GAMBAR 2. LAJU ENERGI β DAN γ VS SELANG WAKTU



GAMBAR 3. BAHAN BAKAR DALAM WADAH BAHAN BAKAR BEKAS CACAD