

## PERHITUNGAN HASIL FISI KRITIKALITAS LARUTAN URANIUM-235 DAN DOSIS RADIASINYA

Indro Yuwono  
Pusat Elemen Bakar Nuklir

### Abstrak

Perhitungan hasil fisi kritikalitas larutan uranium-235 dan dosis radiasinya. Telah dilakukan perhitungan perkiraan hasil fisi larutan uranium-235 dan paparan radiasinya pada unit ekstraksi dan unit evaporasi bila terjadi kecelakaan kritikalitas dalam produksi elemen bakar reaktor riset. Dalam hal ini digunakan metode Grover Tuck dan metode kebolehdjian distribusi fisi. Hasil perhitungan fisi total dengan metode kebolehdjian distribusi fisi adalah  $2,7 \times 10^{18}$  fisi untuk konsentrasi uranium 200 gram/liter dan  $2,5 \times 10^{18}$  fisi untuk konsentrasi 40 gram/liter pada unit ekstraksi. Perhitungan pada unit evaporasi memberikan hasil  $3,1 \times 10^{18}$  fisi untuk konsentrasi 400 gram/liter dan  $1,77 \times 10^{18}$  fisi untuk konsentrasi 80 gram/liter. Untuk metode Grover Tuck hasil perhitungan masing-masing adalah sebesar  $8,267 \times 10^{17}$  fisi dan  $2,878 \times 10^{17}$  fisi. Dosis radiasi yang ditimbulkan untuk larutan 200 gram/liter sekitar 1450,29 Rad untuk neutron dan 4785,96 Rad. untuk gamma.

### Abstract

*The criticality calculation of fission yield of U-235 solution and its radiation dose. The calculation assesment of fission yield of U-235 solution in the the extraction and evaporation units has been performed for the prediction of that when the criticallity accident occurs in the production of fuel element for the research reactor. The Grover Tuck and fission distribution probability methods are used in this case. The calculation result using the fission distribution probability method show the fission of  $2,7 \times 10^{18}$  for the uranium concentration of 200 grams/litre and that of  $2,5 \times 10^{18}$  fissions for U of 40 grams/litre in the extraction unit. The calculation result from the evaporation unit revealed the fission of  $3,1 \times 10^{18}$  for 400 grams/litre uranium and  $1,77 \times 10^{18}$  fissions for 80 grams/litre uranium. Using the Grover Tuck calculation method give results that  $8,267 \times 10^{17}$  fissions and  $2,878$  fissions respectively. Radiaton dose of 200 gram/litre solution is about 1450,29 Rad. for neutron and 4785,96 Rad. for gamma ray.*

### PENDAHULUAN

Dalam produksi elemen bakar reaktor riset GA.Siwabessy yang dilakukan di Instalasi Produksi Elemen Bakar Reaktor Riset (IPEBRR), bahan dasar yang digunakan adalah uranium diperkaya 19,75%. Karena kapasitas produksi minimum IPEBRR sebesar 70 elemen bakar tiap tahun atas dasar 8 jam kerja per hari, jumlah uranium-235 yang ditangani cukup banyak. Salah satu potensi bahaya yang harus diperhitungkan dalam menangani uranium-235 yang merupakan salah satu bahan fisil adalah bahaya kritikalitas.

Kritikalitas adalah reaksi fisi berantai yang terjadi secara spontan. Secara umum reaksi ini dapat digambarkan sebagai berikut:



Reaksi tersebut terjadi apabila perbandingan neutron yang dihasilkan dengan neutron sebelumnya lebih besar atau sama dengan satu, harga perbandingan ini dikenal dengan istilah K efektif ( $K_{eff}$ ). Pada fasilitas yang menangani uranium-235 diatas batas tertentu, yaitu 700 gram<sup>1</sup> atau diatas 500 gram menurut NRC, perancangan fasilitasnya harus memperhitungkan

faktor-faktor penyebab kritikalitas dan sarana lainnya. Pada kecelakaan kritikalitas, jumlah fisi yang dihasilkan dapat mencapai antara  $10^{15}$  -  $10^{19}$  fisi pada rentang waktu 5 detik, mulai saat kritis dan dengan waktu paparan antara 10 menit sampai dengan 40 jam<sup>2</sup>. Pada jarak 3 m dari pusat kritikalitas, pekerja masih dapat menerima dosis dalam tingkat dosis lethal. Semakin tinggi fisi yang dihasilkan, semakin jauh jarak yang memungkinkan penerimaan dosis lethal. Misalnya untuk hasil fisi pada tingkat  $10^{20}$ , jarak dosis lethal mencapai 100 m dari pusat kritikalitas. Kritikalitas ini dapat terjadi pada uranium bentuk padat, serbuk, maupun bentuk cair/larutan. Untuk bentuk larutan, kecelakaan kritikalitas semakin mudah terjadi, karena faktor homogenitas. Data kecelakaan kritikalitas yang pernah terjadi dalam fasilitas nuklir menunjukkan bahwa kritikalitas larutanlah yang paling banyak terjadi<sup>3</sup>. Klasifikasi kecelakaan kritikalitas untuk larutan U-235 dibedakan atas jumlah uranium-235, diameter tangki/volume dan reaktivitasnya. Kecelakaan kritikalitas yang terjadi pada instalasi nuklir non reaktor pada umumnya disebabkan oleh 3 faktor, yaitu faktor kesalahan manusia, faktor kesalahan analisis dan faktor kegagalan proses.

Dalam proses produksi elemen bakar nuklir tersebut, salah satu tahapan proses yang dilalui adalah proses produksi kimia. Pada tahapan ini banyak uranium ditangani dalam bentuk larutan terutama pada proses pengendapan AUC, pelarutan gagal dan ekstraksi. Untuk mengetahui penerimaan dosis maksimum pekerja bila terjadi kritikalitas pada larutan uranium dengan pengkayaan 19,75% dan perkiraan tekanan maksimum yang dihasilkan bila terjadi kecelakaan tersebut, perlu dilakukan perhitungan hasil fisi maksimum dan hasil fisi totalnya. Metode perhitungan dapat dilakukan secara empiris maupun teoritis. Dengan mengetahui fisi maksimumnya dapat diperhitungkan juga jenis *shielding* dan pola evakuasi bagi para pekerja. Dalam analisis ini akan diperhitungkan hasil fisi larutan U-235 dengan cara Grover Tuck dan kebolehdajian distribusi rantai fisi.

## TEORI

Perhitungan perkiraan hasil fisi dari larutan yang mengandung bahan fisil (uranium, plutonium) dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu cara perhitungan oleh Grover Tuck<sup>4</sup> dan cara perhitungan yang dikembangkan oleh G.E.Hansen<sup>5</sup> atas dasar teori kebolehdajian distribusi rantai fisi. Dalam ekskursi kritikalitas larutan ada 3 karakteristik yang ada kaitannya dengan proses rancang bangun, yaitu :<sup>4</sup>

1. Jumlah fisi maksimum yang terjadi dalam rentang waktu 5 detik. Kondisi ini diperlukan untuk mengestimasi dosis personal, desain perisai dan optimasi rute evakuasi.
2. Waktu dan jumlah fisi dari ekskursi digunakan untuk desain kungkungan, sistem penyaringan dan pembuangan udara.
3. Kecepatan maksimum fisi untuk menentukan tekanan yang ditimbulkan akibat ekskursi. Data ini digunakan untuk mendisain tangki, pemipaan serta penentuan kecepatan maksimum perpindahan larutan.

### Metode Grover Tuck

Metode ini dapat digunakan dengan beberapa batasan yaitu :

1. Variasi volume dapat diwakili dengan ukuran silinder dalam sisi vertikal.
2. Dasar silinder harus 30 cm atau lebih di atas reflektor yang baik, misal beton berat.
3. Diameter tangki harus antara 28 dan 156 cm.
4. Kecepatan pengisian tangki (*fill rate*) antara 0,47 dan 0,006 liter/detik.
5. Konsentrasi larutan dapat bervariasi sampai 500 g/liter uranium atau plutonium.

Beberapa rumus empiris yang digunakan dalam metode ini adalah seperti di bawah ini :

### Fisi maksimum dalam interval waktu 5 detik

Persamaan yang digunakan untuk menentukan fisi maksimum adalah :

$$f = 4,6 \times 10^{16} a^x \exp [0,0177 D - \frac{(150 - H)(0,8)a}{D}] \dots \dots \dots (1)$$

Dalam hubungan itu :

f = jumlah fisi maksimum dalam interval waktu 5 detik,

a = kecepatan pengisian liter/detik,

D = diameter dalam tangki (cm),

H = tinggi tangki sampai 150 cm, bila lebih gunakan 150 cm.

Untuk larutan uranium Persamaan (1) tersebut dapat disederhanakan menjadi :

$$f = 2,4 \times 10^{15} V \dots \dots (2), \text{ dimana } V \text{ adalah volume dalam liter.}$$

Akurasi dari Persamaan (1) adalah +100%, -70%, sedangkan Persamaan (2) adalah +70%, -90% .

### Total fisi

Untuk larutan yang tidak mempunyai sistem *external shutdown* ekskursi biasanya terhenti karena pengenceran larutannya. Persamaan untuk total fisi adalah sebagai berikut :

$$Tf = V \times 10^{17} \text{ fisi} \dots \dots \dots (3)$$

dimana V adalah volume dalam liter dan akurasi ± 20% .

Total fisi dapat pula ditentukan dari kecepatan spesifik fisi. Kecepatan spesifik ini pada umumnya digunakan untuk dampak kerusakan fisik karena ekskursi. Kecepatan spesifik pada puncak diperhitungkan dengan persamaan :

$$fr = \frac{7,7 \times 1023}{H^3 D^2} (k)(a)(L/S)^{1/2} \text{ fisi/det.liter} \dots \dots (4)$$

Dalam hubungan tersebut :

D = diameter tangki (cm)

L = dimensi terpanjang (cm)

S = dimensi terpendek (cm)

a = kecepatan pengisian (liter/detik)

H = tinggi kritis (cm)

= 20 cm untuk tinggi 29 - 40 cm

= 10 cm untuk tinggi lebih dari 40 cm.

k = sumber parameter awal, untuk Pu= 1

sedangkan untuk U perlu ditentukan (tabel).

Tekanan maksimum dapat diperhitungkan dengan persamaan :

$$P_{\text{mak}} = 6 \times 10^{-18} \text{ fr kg/cm}^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

Tekanan rata-rata adalah sebagai berikut :

$$P = 2,6 \times 10^{12} \text{ VR fisi/detik.} \quad \dots\dots\dots(6)$$

dimana V = volume dan R = diameter.

Kecepatan spesifik ini telah dikembangkan juga oleh Rocky Flats dalam code EXCUR. Dengan mengetahui tekanan maksimum dapat diperhitungkan kemungkinan kerusakan tangki akibat tekanan bila terjadi kritikalitas.

Waktu ekskursi

Lama ekskursi tergantung pada kondisi awal dan mekanisme shutdown system yang ada pada alat. Apabila tak ada sistem tersebut biasanya waktu minimum dan maksimum ekskursi diestimasikan. Perkiraan waktu ekskursi menurut data minimum 15 menit dan maksimum 37,5 jam. Untuk mengestimasi secara konservatif umumnya diambil minimum 10 menit dan maksimum 40 jam. Perkiraan hubungan antara jumlah fisi yang dihasilkan dan dosis radiasi adalah :

$1 \times 10^6$  f/detik atau  $5 \times 10^{-6}$  watt yaitu sekitar 0,1 mR/jam pada jarak 3 m.

Metode kebolehjadian distribusi fisi

Teori atau cara ini telah dikembangkan oleh G.E. Hansen dari Los Alamos.<sup>5</sup> Melalui penjabaran yang cukup panjang diperoleh persamaan pedekatan untuk menghitung hasil fisi total yaitu :

$$E = \frac{2 a t_2}{b} \quad \dots\dots\dots(7)$$

dalam hubungan ini :

- a = kecepatan penambahan reaktivitas
- b = shutdown coefficient
- t<sub>2</sub> = waktu yang diperlukan untuk mencapai reaktivitas maksimum.

Kecepatan reaktivitas

Kecepatan penambahan reaktivitas linear (a) ditentukan dari excess multiplication (K<sub>ex</sub>) yang tergantung dari spesifikasi tanki, misal ukuran, volume, inventory U-235 dan waktu minimum dimana penambahan dapat terjadi. Persamaan

yang dapat digunakan untuk menghitung harga ini adalah :

$$K_{\text{ex}} = \left[ \frac{n f}{(1+L^2 B^2)(1+B^2)(1+26,27 B^2)(1+2,26 B^2)^2} \right] - 1 \quad \dots\dots(8)$$

dalam hubungan ini :

- K<sub>ex</sub> = faktor kelebihan multiplikasi.
- n = produksi neutron tiap absorsi neutron dalam U-235.
- f = utilisasi neutron termal.
- L = jarak difusi termal.
- B<sup>2</sup> = buckling

Shutdown coefficient

Shutdown coefficient (b) pada umumnya kebalikan dari proposional volume larutan. Maksimum burst terjadi pada volume larutan sama atau lebih besar dari pada volume larutan dimana K<sub>ex</sub> diperoleh. Oleh sebab itu dalam hal ini hanya ditinjau volume larutan dan kapasitas total larutan. Dari penurunan persamaan :

$$b = \frac{1 \text{ dK}}{K \text{ dE}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

diperoleh hubungan :

$$b = \frac{2 v}{V_0} \left( t + \frac{L^2}{1 + L^2 B^2} \right)_0 \left( 1 + \frac{E v}{V_0} \right) B^2 \quad \dots\dots\dots(10)$$

dalam hubungan ini :

- v = kecepatan pembentukan kekosongan (void production rate)
- tiap pelepasan energi,
- v<sub>0</sub> = volume awal tanki/silinder,
- E = energi yang dilepas per fisi.

Persamaan (10) ini dapat dihitung, tetapi harga v sukar ditentukan secara pasti. Harga ini diperkirakan sebesar 20% dari perubahan volume setiap fisi yaitu  $1,4 \times 10^{-16}$  liter/fisi. Sedangkan harga E tergantung dari volume larutan. Hubungan antara volume larutan dan energi yang dilepas per fisi dapat ditentukan secara grafis.<sup>5</sup>

Waktu untuk mencapai reaktivitas maksimum

Untuk menentukan waktu ini (t<sub>2</sub>) digunakan persamaan :

$$t_2^2 = t_1^2 + \frac{2 l}{a} \ln a/bw_1 \quad \dots\dots\dots(11)$$

dalam hubungan ini :

- $t_2$  = waktu untuk mencapai reaktiitas maksimum
- $t_1$  = waktu rata-rata yang diperlukan setelah kritikalitas untuk reaksi berantai
- $l$  = waktu generasi neutron cepat
- $w_1$  = waktu invers

Harga  $1/w_1$  ini dapat didekati dengan harga  $l/at_1$ .

Harga  $t_1$  dapat didekati dengan persamaan :

$$t = t_1 + \beta/a \dots\dots\dots(12)$$

dalam hubungannya :

- $t$  = delay time from criticality ( dianggap 10 detik)
- $t_1$  = waktu untuk mencapai reaksi berantai

$$\beta = \text{fraksi neutron lambat} (0,0065)^8$$

Sedangkan harga  $l$  diperhitungkan dengan persamaan :

$$l = (2,2 \times 10^5 \Sigma_a (1 + L^2 B^2))^{-1} \dots\dots\dots(13)$$

dimana  $\Sigma_a$  adalah tampang lintang per  $\text{cm}^3$  inti atom.

Hubungan jumlah neutron yang dihasilkan (N) dengan laju dosis (r) dinyatakan dalam persamaan :

$$N(r) = \frac{1,08 \times 10^{-13}}{\pi 4 r^2} \text{ rad/fisi} \dots\dots\dots(14)$$

Untuk radiasi gamma besarnya 3,3 kali neutron.

### HASIL PERHITUNGAN DAN BAHASAN

Dalam tahap proses kimia produksi elemen bakar di IPEBRR penanganan U-235 berupa larutan dilakukan di beberapa bagian alat yaitu<sup>1,6</sup>:

1. Konversi AUC dari bahan dasar  $\text{UF}_6$  atau UN.
2. Pelarutan untuk galan berupa  $\text{UAl}_x$ ,  $\text{U}_3\text{O}_8$ ,  $\text{UO}_2$  dan UN.
3. Ekstraksi untuk mengekstraksi UN hasil pelarutan.
4. Evaporasi / pemekatan hasil ekstraksi UN.
5. Tanki penyimpan limbah cair.

Bagian proses yang mempunyai potensi bahaya terbesar atau yang menangani larutan dengan konsentrasi cukup besar adalah bagian ekstraksi dan evaporasi. Kondisi, persyaratan dan

geometri kedua alat yang digunakan dirancang di bawah kondisi kritis dengan batasan :<sup>1</sup>

- 45 % dari massa kritis
- 80 % dari volume kritis
- 90 % dari dimensi kritis

### Unit ekstraksi

Data teknis dari unit ini adalah sebagai berikut :

- Variasi konsentrasi umpan : 40 - 200 g/l UN  
Keluaran sekitar 80 gram/liter
- Moderasi optimum dan reflektor 30 cm ketebalan air
- Tebal slab aman : 8,5 cm
- Diameter aman : 17,1 cm
- $K_{\text{eff}}$  : 0,56
- Tinggi kolom : 3600 mm.

### Unit Evaporasi

Data teknis dari unit ini adalah sebagai berikut :

- Kemampuan evaporasi dari 80 gram/liter menjadi 400 gram/liter UN
- Tebal slab aman : 8,2 cm
- Diameter aman : 18,9 cm
- $K_{\text{eff}}$  : 0,56
- Tinggi : 1026 mm.

Perhitungan dengan cara Grover dibatasi oleh beberapa asumsi/ anggapan yang diambil sedangkan dengan cara kebolehjadian distribusi diperlukan banyak data. Namun demikian karena orde fisinya cukup besar, perhitungan yang dilakukan dengan kedua cara tersebut dapat memberikan paparan radiasi yang masih sangat besar dibandingkan dengan batasan penerimaan dosis radiasi yang ditetapkan. Ditinjau dari segi penerimaan dosis radiasi kedua metode tersebut dapat digunakan. Untuk perhitungan desain alat yang dikaitkan dengan faktor keselamatan maka perhitungan dengan metode kebolehjadian distribusi fisi akan memberikan hasil yang lebih baik.

Dengan Persamaan (2) yaitu metode Grover Tuck, fisi maksimum yang dihasilkan bila terjadi kritikalitas adalah  $19,842 \times 10^{15}$  fisi dan fisi total menurut Persamaan (3) sebesar  $8,267 \times 10^{17}$  fisi.

Perhitungan dengan metode kebolehjadian distribusi fisi untuk unit ekstraksi dipengaruhi oleh konsentrasi larutan uranium yang ada. Dengan Persamaan (7) sampai dengan (13) dan hubungan konsentrasi dengan berbagai variabel ( $f$ ,  $M^2$ ,  $B^2$ ,  $k$ , serta  $H/U$ ) seperti yang disampaikan dalam Gambar 1 sampai dengan Gambar 5. Untuk unit ekstraksi dan unit evaporasi diperhitungkan

pada konsentrasi maksimum sesuai kapasitas alat dan konsentrasi minimumnya.

Contoh perhitungan :

Digunakan konsentrasi maksimum unit ekstraksi yaitu = 200 gram/liter larutan uranium 235.

$H/U = 117,5$  (perhitungan atau Gambar 1).

$f = 0,93$      $k = 1,94$

$M^2 = 32,4$      $B^2 = 0,0285$

Harga  $L^2 = (1-f) L_0^2 = 0,53$

Harga  $T = 32,4 - 0,53 = 31,87$ , harga  $n$  untuk  $U_{235} = 2,7$

Fisi total =  $E = 2at_2/b$  (persamaan 7)

- Harga  $a$  dihitung dengan Persamaan (8) yaitu dari faktor  $K_{ex}$ .

$$a = K_{ex} = \frac{2,7 \times 0,93}{(1,015)(1,0285)(1,75)(113)} - 1 = 0,22$$

- Harga  $b$  dihitung dengan persamaan (10).

$v =$  kecepatan pembentukan kekosongan (*void production rate*) tiap pelepasan energi.  
 $= 20\%$  ( $1,4 \times 10^{-16}$  liter/fisi).

$E =$  energi yang dilepas per fisi dan menurut pustaka (5)  $= 7,5 \times 10^{17}$ .

$b = 16,18 \times 10^{-19}$

- Harga  $t_2$  dihitung menggunakan persamaan (11), (12) dan (13).

$t_2 = 9,96$

Dengan demikian harga  $E = (2)(0,22)(9,96)(16,18 \times 10^{-19}) = 2,7 \times 10^{18}$  fisi.

Dengan cara yang sama untuk konsentrasi uranium minimum yaitu 40 gram/liter fisi sebesar  $2,5 \times 10^{18}$  fisi.

Dengan demikian paparan radiasi yang ditimbulkan bila terjadi kritikalitas masih dapat memberikan dosis letal pada jarak sekitar 4-5 meter dari pusat kritikalitas tanpa pelindung (Persamaan 14). Misalnya untuk jarak 4 meter dari pusat kritikalitas maka besar dosis radiasi pada konsentrasi maksimum (200 gram/liter) mencapai 1450,29 rad untuk radiasi neutron dan sekitar 4785,96 rad untuk radiasi *gamma*.

Penentuan tekanan maksimum didasarkan pada kecepatan spesifik fisi ( $a$ ) (rumus 4), dari perhitungan diperoleh hubungan  $362 \times a$  (liter/detik)  $kg/cm^2$ . Pada operasi normal kecepatan larutan uranium yang digunakan sebesar 24 liter/jam. Dalam hal ini tekanan maksimumnya sekitar  $2,42 kg/cm^2$ .

Seperti halnya pada unit ekstraksi, pada unit evaporasi fisi maksimum yang dihasilkan unit ini adalah  $6,908 \times 10^{15}$  fisi dan fisi total yang dihasilkan sebesar  $2,878 \times 10^{17}$  fisi dengan metode Grover Tuck. Perhitungan dengan metode kebolehjadian distribusi fisi memberikan hasil fisi sebesar  $3,1 \times 10^{18}$  untuk konsentrasi 400 gram/liter dan  $1,77 \times 10^{18}$  untuk konsentrasi uranium 80 gram/liter.

Dari dua metode perhitungan tersebut diatas terlihat bahwa perhitungan dengan metode Grover Tuck memberikan hasil yang berbeda dengan metode distribusi dan sesuai dengan pendekatan yang dilakukannya, sehingga akurasi dari cara perhitungan ini memang tidak terlalu baik. Akurasi dari metode Grover Tuck ini kurang baik disebabkan karena dalam perhitungan hasil fisi pengaruh konsentrasi tidak diperhitungkan sedangkan dengan metode distribusi kebolehjadian fisi pengaruh konsentrasi selalu diperhitungkan. Dengan demikian, untuk variasi konsentrasi unit ekstraksi maupun unit evaporasi tidak akan terlihat pada cara pertama tetapi akan terlihat pada perhitungan dengan cara yang kedua. Dengan demikian, untuk proses disain pemakaian metode kebolehjadian distribusi fisi lebih dianjurkan.

## SIMPULAN

Kesimpulan yang bisa diambil adalah sebagai berikut :

1. Hasil perhitungan perkiraan hasil fisi larutan  $U-235$  di unit ekstraksi dan unit evaporasi IPEBRR bila terjadi kecelakaan kritikalitas menghasilkan fisi total pada orde  $10^{17}$  dan  $10^{18}$  masing-masing dengan metode perhitungan Grover Tuck dan kebolehjadian distribusi fisi.
2. Perhitungan dari kedua metode akan menghasilkan paparan radiasi pada operator yang sangat tinggi dan dapat memberikan dosis letal pada jarak 4-5 meter tanpa pelindung. Untuk itu evakuasi karyawan lain yang berada dalam satu gedung tersebut harus segera dilakukan agar penerimaan paparan radiasi pekerja lain dapat ditekan serendah mungkin.
3. Perhitungan alat yang berkaitan dengan faktor keselamatan sebaiknya dilakukan dengan cara kebolehjadian distribusi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis sampaikan pada teman-teman semua yang telah membantu terselesaikannya tulisan ini baik secara langsung maupun tak langsung. Khususnya pada

Sdri. Darmini yang membantu pengetikkan dan pencetakan karya tulis ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Nukem GmbH, "Basic and Engineering Process Element Fabrication Plants", Nukem VT-No.20080 Vol.10 Germany.
2. Roland Allen Knief, "Nuclear Criticality Safety" Theory and Practice, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois USA.
3. Indro Yuwono, "Keselamatan Kekritisasi Di Lingkungan PEBN Khususnya Di BPEBRR", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Nuklir, Yogyakarta April 1987.
4. Grover Tuck, "Simplified Methods of Estimating the Results of Accidental Solution Excursions", Down Chemical USA., Rocky Flats Divisions, Colorado, 1974.
5. NYO 2980, "Safety Analysis of Enriched Uranium Processing", AEC Research and Development Report, UC-46, Criticality Studies (TID-4500, 15th Ed).
6. Nukem GmbH, "Basic and Detail Engineering Process Element Fabrication Plant" Nukem VT-No.20080. Vol. 10. Germany.
7. Diktat kuliah teknik nuklir Pakistan.
8. Samuel Glasstone, "Nuclear Reactor Engineering" Van Nostrand Reinhold Company, New York.
9. Soetaryo Supadi, "Diktat kuliah Teknik Nuklir UGM"

#### TANYA JAWAB

##### 1. Siti Nurhayati

- Apakah sudah diperoleh data perhitungan hasil fisi kritikalitas, sehingga dapat diketahui

pada kondisi yang mana keadaan tersebut benar-benar akan terjadi kritis.

- Apakah sudah dilakukan perhitungan untuk padatan atau serbuk.

##### Indro Yuwono

- Perhitungan ini hanya untuk memperkirakan bila terjadi kecelakaan kritikalitas, berapa besar jumlah fisi total dan paparan radiasi yang terjadi/ditimbulkan pada kondisi kritis.
- Perhitungan untuk padatan dan serbuk belum dilakukan.

##### 2. Taufik Usman

- Bagaimana pengaruh kritikalitas terhadap suhu dan tekanan pada bahan fisi dan wadahnya.

##### Indro Yuwono

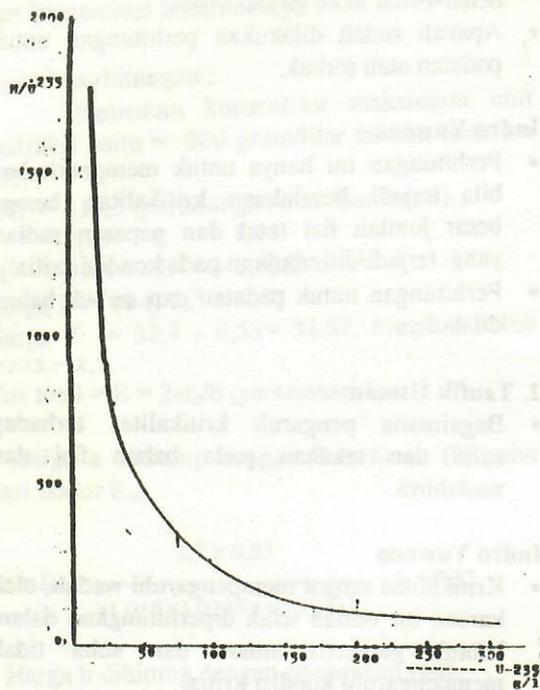
- Kritikalitas sangat mempengaruhi wadah, oleh karena itu wadah telah diperhitungkan dalam bentuk geometri aman, dan suhu tidak mempengaruhi kondisi kritis.

##### 3. Siti Amini

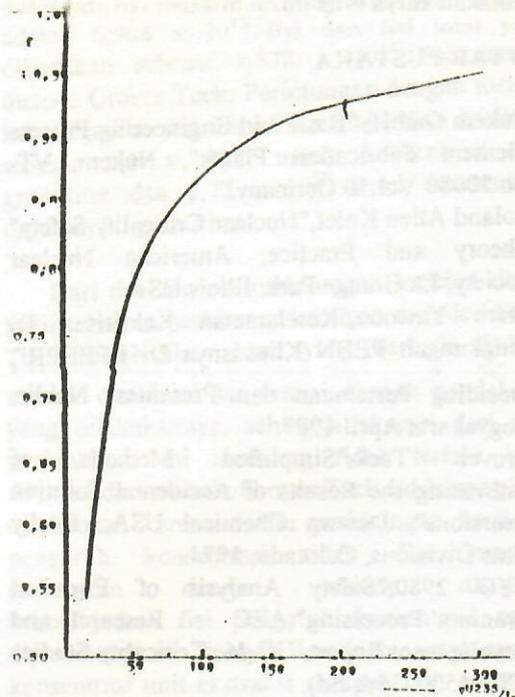
Apa arti dari orde hasil fisi sebesar  $10^{17}$ - $10^{18}$ , sedangkan di tempat penyimpanan tidak ada n atau fluks n tidak sampai  $10^{17}$ .

##### Indro Yuwono

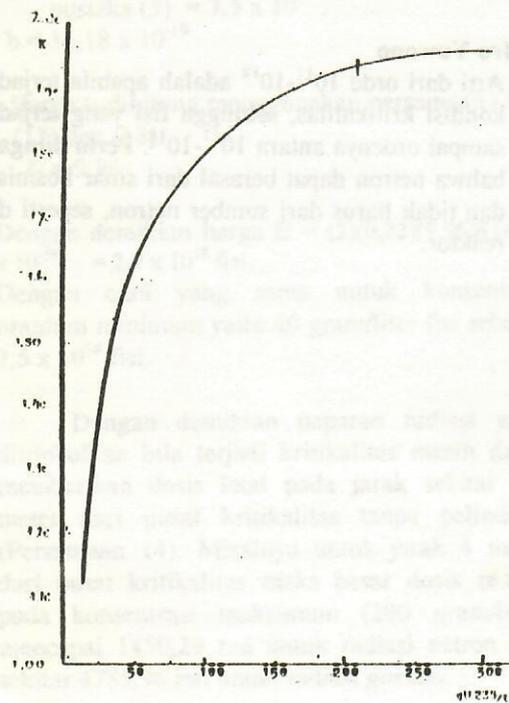
- Arti dari orde  $10^{17}$ - $10^{18}$  adalah apabila terjadi kondisi kritikalitas, sehingga fisi yang terjadi sampai ordenya antara  $10^{17}$ - $10^{18}$ . Perlu diingat bahwa neutron dapat berasal dari sinar kosmis, dan tidak harus dari sumber neutron, seperti di reaktor.



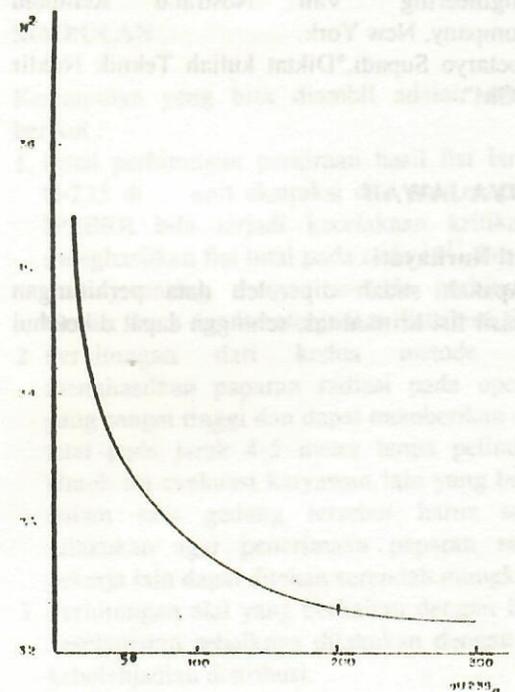
Gambar 1. Hubungan antara konsentrasi  $U^{235}$  g/liter dengan perbandingan  $H/U^{235}$



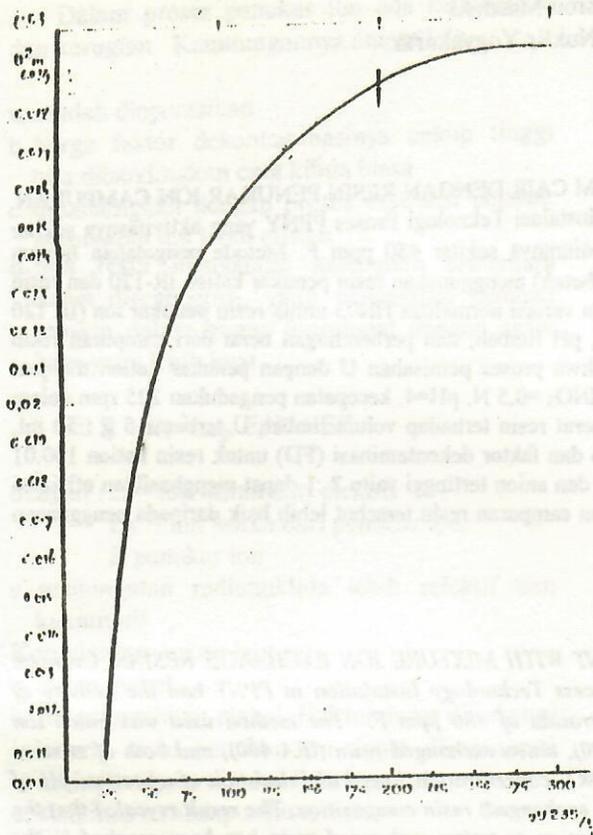
Gambar 2. Hubungan antara konsentrasi  $U^{235}$  g/l dengan faktor utilitas termal (f)



Gambar 3 Hubungan antara konsentrasi  $U^{235}$  g/liter dengan faktor multiplikasi (k)



Gambar 4. Hubungan antara konsentrasi  $U^{235}$  g/l dengan migration area (M)



Gambar 5. Hubungan antara konsentrasi  $U^{235}$  g/l dengan buckling B