

## ANALISIS KESELAMATAN KRITIKALITAS GUDANG URANIUM IPEBRR

Indro Yuwono

Pusat Elemen Bakar Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

### ABSTRAK

ANALISIS KESELAMATAN KRITIKALITAS GUDANG URANIUM IPEBRR. Telah analisis dilakukan analisis keselamatan kritikalitas gudang uranium diperkaya maksimum 19,75% untuk IPEBRR. Dilakukan perhitungan massa kritis, jarak aman dan kapasitas gudang uranium untuk semua ruangan/ sel gudang. Massa kritis, jarak aman dan kapasitas gudang dihitung masing-masing dengan menggunakan metode grafis, densitas permukaan dan indikator kritikalitas. Hasil perhitungan adalah dari 6 sel gudang tersebut menunjukkan bahwa jarak aman adalah 65 cm vs 70 cm yang digunakan, massa kritis 9 kg vs 1,738 kg yang digunakan, diameter kritis silinder 17 cm vs 12 cm yang dipakai. Pada harga indikator kritikalitas 0,44 kapasitas gudang memungkinkan pemakaian sampai 227 drum vs 20 drum pada kenyataannya. Bahaya kritikalitas diharapkan tak akan timbul apabila semua ketentuan yang telah ditetapkan dipatuhi. Ketentuan tersebut meliputi massa aman, jarak aman, geometri aman. Untuk lebih menjamin keselamatan kritikalitas perlu juga diberlakukan kontrol administrasi.

### ABSTRACT.

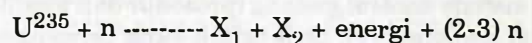
IPEBRR URANIUM STORAGE CRITICALITY SAFETY ANALYSIS. Criticality safety analysis of IPEBRR uranium storage with a maximum enrichment of 19.75% has been performed. Calculations of critical mass, safe distance and storage capacity are done for all cells. The critical mass, safe distance and storage capacity are calculated by graphycal method, surface distance and critically indicator respectively. Calculation results for the 6 storage cells show that safe distance is 65 cm mhile? vs safe distance of 70 cm adapted. 9 kg critical mass versus 1.738 kg safe mass used, 17 cm cylinder critical diameter versus 12 cm safe diameter used. Criticality indicator value is found to be 0.44 meaning that the storage capacity can be possible until 227 drums, versus omly for 20 drums employed. If all of the rekated procedure are obeyed, criticality accidnt will not occur. These procedures consist of control on the safe mass, safe distance and safe geometry. In addition the criticality safety can be more assured by employing administration control.

### PENDAHULUAN

Peranan gudang dalam proses produksi elemen bakar reaktor riset yang menggunakan uranium diperkaya 19,75% sangat penting. Gudang dalam proses produksi ini berfungsi untuk menyimpan bahan bakar jadi sebelum dikirim ke pemakai ataupun bahan dasar yang akan diproses serta bahan yang masih dalam proses antara. Gudang uranium di IPEBRR terdiri dari 6 ruangan/sel dan bahan yang disimpan dapat berupa padat ataupun cair. Salah satu bahaya yang mungkin timbul dalam penyimpanan uranium diperkaya adalah kemungkinan terjadinya kecelakaan kritikalitas. Kecelakaan ini dapat terjadi bila salah satu faktor penyebab terjadinya kritikalitas terabaikan. Guna mencegah terjadinya kecelakaan kritikalitas tersebut maka perlu dilakukan kontrol kritikalitas.

Kritikalitas dapat terjadi apabila harga faktor multiplikasi efektif ( $K_{eff}$ ) sama dengan

atau melebihi satu [1].  $K_{eff}$  ini merupakan perbandingan jumlah netron pada generasi sebelumnya. Kritikalitas terjadi karena adanya reaksi fisi dari bahan fisil, dalam hal ini adalah U-235, yang secara umum dapat digambarkan sebagai berikut [2] :



Dalam hal ini netron kemungkinan datang dari alam/sinar kosmis. Dalam kecelakaan kritikalitas jumlah fisi yang terjadi dapat mencapai antara  $10^{15}$  -  $10^{17}$  pada interval waktu 5 detik mulai saat kritis dan lama paparan antara 10 menit sampai dengan 40 jam [3].

Untuk menghindari dan mencegah terjadinya bahaya kritikalitas dalam fasilitas yang menangani uranium diperkaya di atas batas yang ditetapkan, yaitu 700 gram [4] atau di atas



500 gram menurut NRC, maka dalam merancang fasilitas yang demikian harus memperhitungkan faktor-faktor penyebab kritikalitas. Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap terjadinya bahaya kritikalitas antara lain adalah bentuk peralatan, volume, massa, konsentrasi serta tingkat pengayaan dari uranium [5]. Demikian juga efek dari moderator, reflektor, rancun neutron dan interaksi harus dipertimbangkan juga. Basis rancang bangun gudang uranium IPEBRR dibuat oleh NUKEM GmbH sehingga untuk lebih meyakinkan dan menjamin rasa aman terhadap bahaya kritikalitas bagi para pekerja perlu dilakukan analisis keselamatan kritikalitas terhadap kondisi gudang yang telah ada.

Dalam analisis ini akan dibahas sejauh mana kondisi gudang uranium yang ada di IPEBRR memenuhi persyaratan sehingga terhindar dari bahaya kritikalitas. Perhitungan dilakukan pada jarak penempatan dengan cara densitas permukaan, kapasitas gudang dengan indikator kritikalitas dan massa aman secara grafis.

## TEORI

Penanganan U-235 di atas batasan yang telah ditentukan yaitu 700 gram akan memberikan resiko kecelakaan kritikalitas [6]. Setiap saat selama operasi berlangsung U-235 dapat berada di pelbagai tempat yang berbeda. Salah satu tempat dimana uranium selalu berada adalah gudang uranium. Dalam gudang ini tersimpan uranium dalam bentuk bahan dasar, hasil antara dan hasil akhir serta gagal yang mengandung uranium.

Dalam praktek, keselamatan kritikalitas nuklir di luar reaktor, ada dua hal yang harus diperhatikan yaitu praktek administrasi dan praktek teknisnya [6]. Pada penyimpanan atau penggudangan bahan fisil hal-hal yang berkaitan dengan administrasi antara lain adalah metode kontrol gudang (prosedur dan kualifikasi personel) [7]. Sedangkan yang berkaitan dengan teknis antara lain adalah jarak penyimpanan, kapasitas penyimpanan, batasan massa dan geometri alat.

## INDIKATOR KRITIKALITAS (CI) DAN INDEK TRANSPOR (TI)

Kontrol kritikalitas sangat diperlukan dalam penanganan bahan fisil, dalam hal ini adalah U-235. Setiap kontener yang berisi bahan fisil harus dilengkapi dengan Indikator Kritikalitas (CI) yang berkaitan dengan volume sel

atau kontener. Dengan sistem ini banyaknya bahan fisil yang boleh disimpan dalam suatu gudang uranium dapat ditentukan. Hubungannya adalah [8]:

$$CI = \frac{100}{N}$$

N = jumlah total kontener yang diijinkan dalam susunan penyimpanan

Harga CI yang sangat bersifat indikator, tergantung dari tipe bahan fisilnya dan tak boleh melebihi 100. Penentuan CI ini tergantung dari massa bahan fisilnya. Ada 2 kategori yang digunakan:

1. Huruf tunggal, misal: A, B, ..... yang berarti sub kritis bila dimasukkan dalam air, jadi dapat mengalami semua perlakuan.
2. Huruf ganda, misal: AA, BB, ..... yang berarti kritis bila tercelup dalam air, jadi harus ada perlakuan khusus agar hal ini tidak terjadi.

Kategori massa ini dapat dilihat Tabel 2, sedang Tabel 3 menunjukkan CI dari sel dalam penyimpanan reflektor beton (concrete). Penggunaannya perlu mengingat hal-hal berikut:

- a. Bahan fisil yang mempunyai kandungan dalam batas antara yang tercantum di tabel harus digunakan harga yang tinggi.

Misal:  $U(55)O_2 \longrightarrow$  dipakai  $U(70)O_2$

- b. Unit dari kategori massa mungkin dibuat lebih kecil dari kandungan dan unit dari bahan fisil harus di tengah sel/kontener dengan 10% volume lebih kecil dari dimensi sel. Perbandingan dimensi dari bagian pembentuk sudut antara yang terbesar dan terkecil tak boleh lebih dari 3. Jarak antara unit massa dan sel tak kurang dari 155mm.
- c. Penentuan harga CI sel dari volume kontener yang tak ada dalam tabel dilakukan interpolasi dengan hubungan :

$$CI V^2 = CI_1 V_1^2$$

$CI_1, V_1$  adalah harga-harga dalam Tabel sedangkan V adalah volume kontener yang ada.

Indek transpor (TI) diperlukan untuk memberi tanda pada wadah guna menjamin keselamatan selama transportasi bahan fisil. Dengan TI akan dapat diketahui dengan segera kelas dan cara penanganan bahan fisil yang akan dipindah/diangkut. Pemberian label TI hanya diperlukan pada pengangkutan elemen bakar keluar dari gudang untuk dikirim ke fasilitas lain.



Tabel 2. Kategori massa bahan fisil dalam penggunaan sistem *Criticality Indicator*

Bahan fisil	U (100)			U (93,2)			U (80)			U (70)			U (50)			U (30)		
	U	U(100)O3		U	U(93,2)O2		U(80)	U(80)O2		U(70)	U(70)O2		U(50)	U(50)O2		U(40)	U(30)	
Atom H : U	0	0,4	3,0	0	0,4	3,0	0	0,4	3,0	0	0,4	3	0	0,4	3,0	0	0	
densitas (g/cm <sup>3</sup> )	18,7	8,3	4,5	18,7	8,3	4,5	18,7	8,3	4,5	18,7	8,3	4,5	18,7	8,3	4,5	18,7	18,7	
Kategori massa	Massa dari bahan fisil (kg)																	
	A	2,4	2,1	1,4	2,6	2,3	1,4	2,8	2,5	1,6	3,1	2,9	1,7	4,2	3,6	2,0	5,3	6,6
B	2,8	2,5	1,6	3,1	2,7	1,7	3,2	3,0	1,8	3,7	3,4	2,0	5,0	4,3	2,4	6,3	7,9	
C	3,2	2,9	1,9	3,6	3,1	1,9	3,7	3,5	2,1	4,2	3,9	2,3	5,8	5,0	2,7	7,2	9,1	
D	3,6	3,3	2,1	4,0	3,5	2,2	4,3	4,0	2,4	4,8	4,4	2,6	6,6	5,7	3,1	8,3	10,4	
E	4,1	3,7	2,4	4,5	4,0	2,5	4,8	4,5	2,7	5,4	5,0	3,0	7,4	6,4	3,5	9,3	11,7	
F	4,5	4,1	2,7	5,0	4,4	2,6	5,3	5,0	3,1	6,0	5,6	3,3	8,2	7,1	3,9	10,4	13,0	
G	4,9	4,5	2,9	5,5	4,9	3,1	5,8	5,5	3,4	6,6	6,2	3,7	9,1	7,9	4,3	11,4	14,4	
H	5,4	5,0	3,2	6,0	5,4	3,4	6,4	6,1	3,7	7,2	6,8	4,0	10,0	8,7	4,8	12,6	15,9	
I	5,8	5,4	3,5	6,5	5,9	3,7	7,0	6,6	4,1	7,9	7,4	4,4	10,9	9,5	5,2	13,7	17,3	
J	6,3	5,9	3,8	7,0	6,4	4,0	7,5	7,2	4,4	8,5	8,0	4,8	11,8	10,3	5,7	14,9	18,9	
K	6,8	6,4	4,1	7,6	6,9	4,3	8,1	7,6	4,8	9,2	8,7	5,2	12,8	11,2	6,1	16,1	20,4	
L	7,3	6,9	4,5	8,1	7,4	4,7	8,7	8,4	5,1	9,9	9,4	5,6	13,8	12,1	6,6	17,4	22,0	
M	7,7	7,4	4,8	8,7	7,9	5,0	9,3	9,0	5,5	10,6	10,1	6,0	14,8	13,0	7,1	18,6	23,7	
N	8,2	7,9	5,1	9,2	8,5	5,4	9,9	9,7	5,9	11,3	10,8	6,4	15,8	13,9	7,6	20,2	25,4	
O	8,7	8,4	5,5	9,8	9,1	5,7	10,6	10,3	6,3	12,0	11,5	6,8	16,9	14,9	8,1	21,3	27,2	
P	9,3	8,9	5,8	10,3	9,7	6,1	11,0	11,0	6,8	12,8	12,3	7,3	17,9	15,9	8,7	22,7	29,0	
Q	9,8	9,5	6,2	10,9	10,3	6,5	11,9	11,7	7,2	13,6	13,1	7,8	19,1	16,9	9,3	24,2	30,9	
R	10,3	10,1	6,6	11,5	10,9	6,9	12,6	12,4	7,8	14,4	13,9	8,3	20,2	18,0	9,9	25,7	32,9	
S	10,8	10,7	7,0	12,1	11,6	7,3	13,2	13,2	8,1	15,2	14,8	8,8	21,4	19,1	10,5	27,2	34,9	
T	11,4	11,3	7,4	12,7	12,2	7,8	13,9	13,9	8,6	16,0	15,6	9,3	22,6	20,3	11,1	28,8	37,0	
U	11,9	11,9	7,8	13,3	12,9	8,2	14,7	14,7	9,1	16,9	16,5	9,9	23,9	21,5	11,7	30,4	39,2	
V	12,5	12,6	8,3	14,0	13,6	8,7	15,4	16,6	9,6	17,7	17,4	10,4	25,2	22,7	12,4	32,1	41,5	
W	13,1	13,3	8,7	14,6	14,4	9,1	16,2	16,4	10,1	18,6	18,4	11,0	26,5	24,0	13,1	33,8	43,8	
AA	13,6	14,0	9,2	15,3	15,1	9,6	16,9	17,3	10,6	19,5	19,4	11,6	27,9	25,3	13,6	35,6	46,2	
BB	14,2	14,7	9,6	15,9	15,9	10,1	17,7	18,2	11,2	20,5	20,4	12,2	29,4	26,7	14,6	37,5	48,8	
CC	14,8	15,4	10,1	16,6	16,7	10,7	18,5	19,1	11,8	21,4	21,5	12,9	30,8	28,1	15,4	32,4	51,4	
DD	15,4	16,2	10,7	17,3	17,5	11,2	19,4	20,1	12,4	22,4	22,6	13,5	32,4	29,6	16,2	41,5	54,1	
EE	16,0	17,0	11,2	18,0	18,4	11,8	20,2	21,1	13,0	23,5	23,8	14,2	33,9	31,2	17,1	43,6	57,0	
FF	16,7	17,8	11,7	18,7	19,3	12,4	21,1	22,1	13,7	24,5	25,0	15,0	35,6	32,8	17,9	45,7	59,9	
GG	17,3	18,6	12,3	19,4	10,1	13,0	22,0	23,2	14,4	25,6	26,2	15,7	37,3	34,5	18,9	47,9	63,0	
HH	18,0	19,5	12,9	20,2	21,2	13,6	22,9	24,4	15,1	26,7	27,5	16,5	39,0	36,3	19,8	50,2	66,3	



Tabel 3. Harga *Criticality Indikator* dari sel dalam penyimpanan (refl. beton)

Volume sel liter (gal)	18,9 (5)	37,8 (10)	56,8 (15)	75,7 (20)	94,6 (25)	113,6 (30)	132,5 (35)	151,4 (40)	170,3 (45)	189,3 (50)	208,2 (55)	227,1 (60)	416,4 (110)
Kategori massa													
A	0,08	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
B	0,14	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
C	0,21	0,06	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
D	0,31	0,08	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
E	0,43	0,12	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
F	0,59	0,17	0,08	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
G	0,79	0,23	0,11	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
H	1,03	0,30	0,14	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
I		0,40	0,19	0,11	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
J		0,51	0,24	0,14	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01
K		0,64	0,31	0,18	0,12	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,01
L		0,81	0,39	0,23	0,15	0,11	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,01
M		1,00	0,49	0,29	0,19	0,14	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,01
N		1,23	0,61	0,37	0,24	0,17	0,13	0,10	0,08	0,07	0,05	0,05	0,01
O			0,75	0,45	0,30	0,22	0,16	0,13	0,10	0,08	0,07	0,06	0,02
P			0,92	0,56	0,37	0,27	0,20	0,16	0,13	0,10	0,09	0,07	0,02
Q			1,12	0,68	0,46	0,33	0,25	0,19	0,16	0,13	0,11	0,09	0,03
R				0,83	0,56	0,40	0,31	0,24	0,19	0,16	0,13	0,11	0,03
S				1,00	0,68	0,49	0,37	0,29	0,24	0,19	0,16	0,14	0,04
T				1,20	0,82	0,60	0,46	0,36	0,29	0,24	0,20	0,17	0,05
U					0,99	0,72	0,55	0,44	0,35	0,29	0,24	0,21	0,07
V					1,19	0,87	0,67	0,53	0,43	0,35	0,30	0,25	0,08
W						1,05	0,81	0,64	0,52	0,43	0,36	0,31	0,10
AA							0,97	0,77	0,63	0,52	0,44	0,38	0,12
BB							1,17	0,93	0,76	0,63	0,53	0,46	0,15
CC								1,12	0,92	0,76	0,65	0,56	0,18
DD									1,11	0,92	0,78	0,67	0,23
EE										1,12	0,95	0,82	0,28
FF											1,15	0,99	0,34
HH												1,21	0,42
													0,52



**HUBUNGAN CI DAN TI**

Dalam peraturan transportasi bahan fisil dibedakan 2 macam bungkusannya yaitu yang rusak dan tak rusak. Kondisi ini ditentukan melalui prosedur-prosedur pengujian yang telah ditetapkan. Untuk bahan fisil kelas II dapat digunakan rumus:

$$TI = \frac{50}{NA} = \frac{250}{N}$$

NA = 5 x jumlah bungkusannya tak rusak yang diijinkan, sub kritis dalam susunan tertutup dan di lingkungan reflektor yang tak terbatas.

= 2 x jumlah bungkusannya rusak yang tak diijinkan tetapi sub kritis dalam bermacam-macam susunan dengan adanya air dan sesuai hasil pengujian.

Hubungan CI dan TI dapat dinyatakan dengan:

$$TI = 2,5 CI$$

hubungan antara kategori massa untuk penyimpanan dan transportasi bahan fisil seperti Tabel 1.

Tabel 1. Hubungan antara kategori massa untuk penyimpanan dan transportasi bahan fisil [8].

Penyimpanan	Transportasi	Penyimpanan	Transportasi
A - D	A	S	M
E	B	T	N
F	C	U	O
G, H	D	V	P
I	E	W	Q
J	F	AA	R
K, L	G	BB	S
M	H	CC	T
N	I	DD	U
O	J	EE	V
P, Q	K	FF	W
R, L	L	GG	AA
		HH	BB

Cara penentuan jarak aman dapat dilakukan dengan berbagai cara. Salah satunya adalah cara densitas permukaan. Cara ini hanya benar untuk jumlah unit penyimpanan yang sedikit (di bawah 25 unit). Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut [9]:

$$T = T_o \times 0,54 (1 - 1,37 f)$$

$$d = \left( \frac{nm}{T} \right)^{0,5} = 1,37 \left( \frac{nm}{T_o (1 - 1,37 f)} \right)^{0,5}$$

T<sub>o</sub> = densitas permukaan dari slab tak terbatas dengan reflektor air (g/cm<sup>2</sup>).

= tebal slab x konsentrasi

f = rasio antara massa dalam tangki dengan massa kritis dari sistem bola tak terefleksi.

d = jarak aman

n = jumlah unit terproyeksi di lantai

m = massa dari unit (gram)

**PEMBAHASAN**

Asumsi-asumsi yang digunakan untuk merancang gudang di IPBERR [10] adalah :

1. Pengayaan U-235 yang disimpan tidak melebihi 20%.
2. Kapasitas simpan dapat memenuhi kelancaran produksi selama satu tahun.

Demikian juga areal penggudangan dibedakan menjadi 2 yaitu, adanya moderasi optimum dan areal dengan asumsi adanya moderasi terkontrol (H/U=10).

Kedua areal dipisahkan satu dari yang lain dengan pintu dan dinding. Sebagai wadah untuk menyimpan uranium digunakan drum atau kisi-kisi kerangka baja dan menggunakan rak-rak susun.

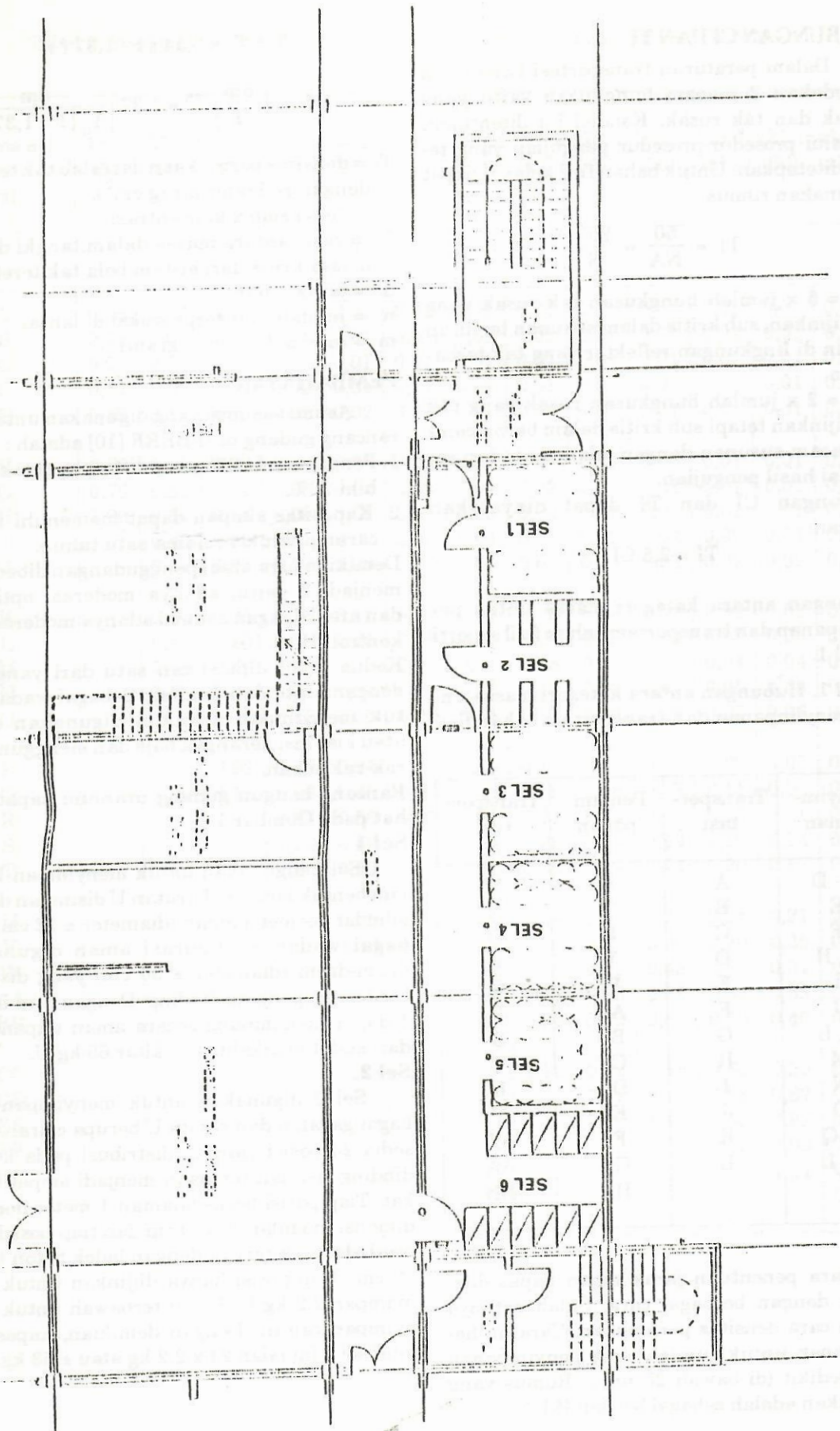
Rancang bangun gudang uranium dapat dilihat pada Gambar 1.

**Sel 1**

Sel 1 digunakan untuk menyimpan U dalam bentuk larutan. Larutan U disimpan dalam silinder geometri aman (diameter ± 12 cm). Sebagai wadah konfigurasi aman digunakan drum-drum (diameter ± 50 cm) yang disusun berderet sepanjang dinding. Dengan cara ini sel 1 dapat menampung secara aman (dipandang dari sudut kritikalitas) sekitar 65 kg U.

**Sel 2**

Sel 2 digunakan untuk menyimpan pelbagai gagalannya dan residu U berupa cairan. Tersedia 24 posisi yang terdistribusi pada kedua dinding sisi dan tersusun menjadi empat tingkat. Tiap posisi berkedalaman 1 meter dengan dimensi modular 60 x60 cm dan tiap posisi terpisah dari sekitarnya dengan balok beton tebal 30 cm. Tiap posisi hanya diijinkan untuk menyimpan 2,2 kg U. Posisi terbawah untuk menyimpan cairan. Dengan demikian, kapasitas total sel 2 ini ialah 24 x 2,2 kg atau ± 53 kg.



Gambar 1. Rancang bangun gudang uranium



**Sel 3**

Sel 3 digunakan untuk menyimpan hasil antara seperti  $UO_2$ ,  $UF_4$ ,  $U_3O_8$ ,  $UAl_x$ , dan logam U. Di sel ini tersedia 20 posisi simpan. Drum-drum penjarak disusun membentuk dua deret sepanjang dua dinding sisi sel, sehingga memberikan ruang gerak di antara deret selebar 130 cm (seperti sel 1). Tiap drum dirancang mampu menampung 8,8 kg sehingga kapasitas total adalah 175 kg dengan status massa aman dan moderasi terkontrol.

**Sel 4.**

Sel 4 untuk menyimpan hasil antara dan gagal yang berasal dari kegiatan pembuatan pelat elemen bakar dan perakitan. Cara pengaturan penyimpanan dapat menyerupai yang berlangsung di sel 3. Tiap posisi simpan memiliki disain massa aman untuk 1 elemen bakar.

**Sel 5.**

Sel ini untuk menyimpan  $UF_6$  dalam kemasan silinder baja. Geometri aman berisi 16 kg U atau sekitar 25 kg  $UF_6$ . Di sel ini disediakan 19 posisi simpan baik dengan drum maupun kisi kerangka baja yang disusun membentuk ladam kuda. Tiap posisi menyimpan 1 silinder  $UF_6$ . Dengan demikian kapasitas total sel 5 adalah  $\pm 304$  kg U yang cukup untuk operasi selama  $\pm 2-3$  tahun.

**Sel 6.**

Sel 6 untuk menyimpan elemen bakar jadi dengan kondisi moderasi terkontrol. Di sini digunakan penyimpanan memakai rak dengan kisi 125(t) x 60(l) x 60(p) cm. Tiap modul dapat digunakan untuk menyimpan 3 elemen bakar atau sejumlah pelat yang ekuivalen dengan itu. Dengan demikian kapasitas total sel ini adalah untuk  $\pm 144$  elemen bakar atau sejumlah pelat yang ekuivalen dengan itu.

Dalam Tabel 2 terlihat bahwa pengayaan 20% tidak tertulis. Sesuai ketentuan, sebagai dasar analisis digunakan pengayaan yang lebih tinggi, yaitu 30% [9]. Penentuan kategori massa untuk penyimpanan mempunyai batasan yang lebih longgar dibandingkan batasan dalam transportasi karena dalam penyimpanan kondisinya dapat dibuat tetap. Contoh penggunaan kedua kategori massa tersebut seperti tertera dalam Tabel 1. Sebagai contoh untuk penyimpanan, indeks A-D dapat disamakan tetapi untuk transportasi berbeda antara indeks A,B,C ataupun D.

**Sel 1.**

Diameter geometri aman  $\pm 12$  cm  
Diameter konfigurasi aman  $\pm 50$  cm.

a. Volume tiap drum adalah 8 l dengan konsentrasi larutan 400 gr/l, berat uranium =  $8 \times 400 = 3200$  gr.

Menurut Tabel 2 dan Tabel 3 kategori massa

$$A \text{ dan } CI = \frac{(18,9)^2 (0,08)}{(8)^2} = 0,44 \dots\dots\dots$$

Dengan harga  $CI = 0,44$  jumlah drum yang boleh ditempatkan dapat mencapai kira-kira  $\frac{100}{0,44} \approx 227$  drum. Dalam kenyataannya hanya dipersiapkan 20 drum jadi sangat aman.

b. Moderasi yang digunakan dalam sel ini adalah moderasi optimum yang menurut Gambar 2 massa kritisnya (bentuk bola, larutan  $UO_2F_2$ , reflektor air 25 mm) adalah

$$0,85 \text{ kg U-235} = 0,85 \times \frac{100}{19,25} = \approx 4,30 \text{ kg.}$$

U pengayaan 19,75% yang ada dalam tiap drum 3,2 kg. yang berarti massa amannya =  $\frac{3,2}{4,3} \times 100 \% = 74 \%$  dari massa kritis.

Sedangkan diameter drum 12 cm yang menurut Gambar 3, diameter kritis adalah 17 cm.

**Sel 2.**

Sel ini untuk padat atau cair, kondisi yang digunakan adalah moderasi optimum, jadi massa kritis 4,30 kg dan digunakan massa aman = 2,2 kg untuk tiap posisi.

Volume/posisi =  $10 \times 6 \times 6 = 360$  l, maka

$$CI = 0,01 \left( \frac{227,1}{360} \right)^2 = 0,003$$

Jadi jumlah kontener dapat lebih dari 24 posisi. Dengan demikian 24 posisi masih sangat aman.

**Sel 3.**

Sel ini untuk menyimpan bahan bentuk padat dengan 20 posisi dalam drum-drum massa = 8,8 kg U atau U-235 =  $0,1925 \times 8,8 \text{ kg} = 1,738$  kg.

Harga H : U = 10, massa kritisnya adalah 9 kg U-235 atau sekitar 45 kg U.

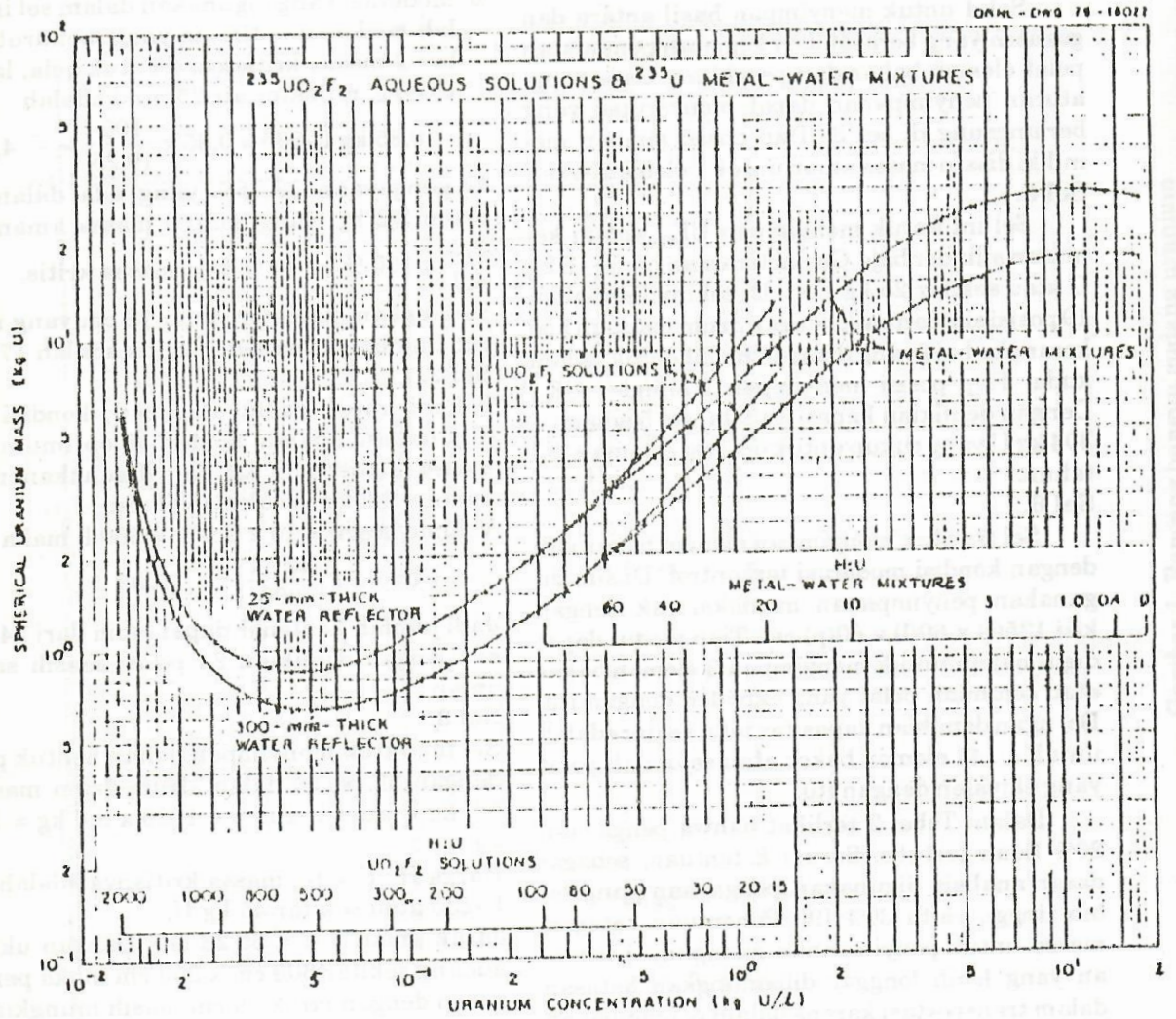
Jarak aman =  $d = 65,26$  cm. Dengan ukuran gudang sekitar 300 cm x 350 cm maka penempatan dengan jarak 70 cm masih mungkin.

**Sel 4.**

Sel 4 ini kondisinya sama dengan sel 3 dan tiap posisi simpan hanya 1 elemen bakar atau mengandung U-235 = 250gram dan U total = 1250 gram. Kondisi masih aman dari bahaya kritikalitas.

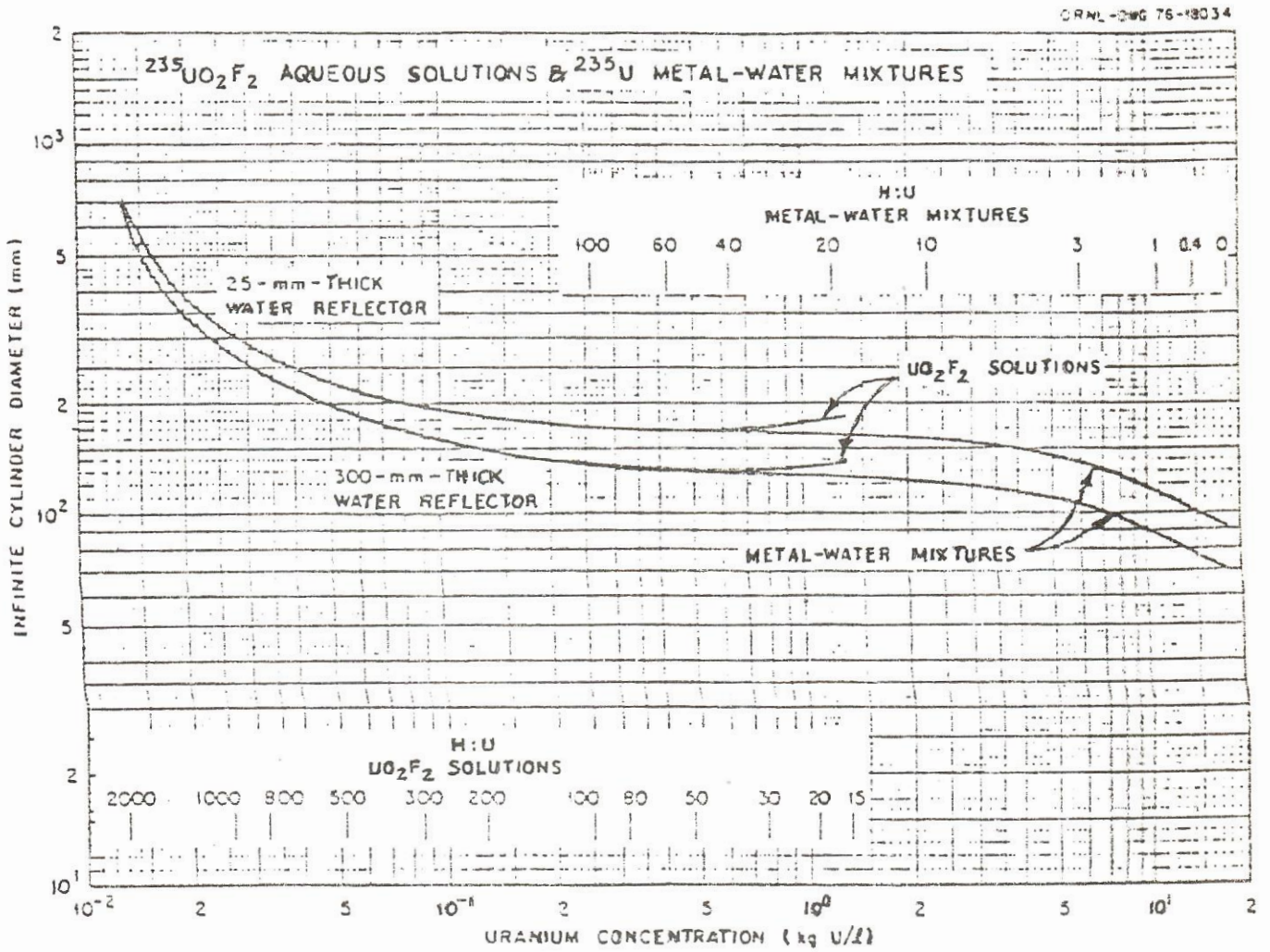
**Sel 5.**

Sel ini untuk  $UF_6$  geometri aman berisi 16 kg U atau  $0,1925 \times 16 \text{ kg} = 3,16$  kg atau 25 kg  $UF_6$



Gambar 2. Batas massa sub kritis untuk setiap bola dari homogeneous water - reflected dan U-235 yang termoderasi





Gambar 3. Batas diameter sub kritis untuk setiap silinder *homogeneous water - reflected* dan U-235 yang termoderasi



dengan 19 posisi, volume tabung kira-kira =  $\pi / 4 D^2 \times 75 = \pi / 4 (11,90)^2 \times 75 = 8,34$  liter  
Batasan massa kritis sekitar 9 kg U-235.

#### Sel 6.

Volume kisi rak =  $125 \times 60 \times 60 = 450$  l.

Kapasitas tiap modul = 3 elemen bakar

U-235 =  $3 \times 250 \text{ gr} = 750 \text{ gr}$ .

Batasan massa kritis untuk U metal sekitar 9 kg, dengan demikian kondisi ini masih sangat aman.

Dari uraian tersebut di atas terlihat bahwa batasan yang digunakan untuk menentukan massa aman adalah cukup besar, misal untuk massa kritis 4,3 kg dengan batasan reflektor air setebal 25 mm digunakan batasan aman 3,2 kg. Demikian juga untuk diameter kritis 17 cm digunakan diameter aman 12 cm. Jarak penempatan aman cukup 65 cm tetapi prakteknya jarak penempatan mencapai 70 cm.

Dilihat dari indikator kritikalitas kemampuan penyimpanan dapat mencapai 227 drum, namun demikian gudang ini hanya diperuntukkan 20 drum.

Menurut pustaka [3] dan [5] kecelakaan kritikalitas yang terjadi sebagian besar penyebabnya adalah kelalaian operator. Untuk itu perlu dilakukan juga kontrol administrasi. Dengan kontrol administrasi dalam gudang maka dapat dihindari beberapa penyebab terjadinya kecelakaan kritikalitas.

Berikut beberapa penyebab yang dapat dihindari dengan adanya kontrol administrasi.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Samuel Glastone and Alexander Sesonske., Nuclear Reactor Engineering, New York.
2. Sutarya S., Bahan Kuliah Teknik Nuklir, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta
3. Ronald Allen Knief., Nuclear Criticality Safety Theory and Practice, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, USA.
4. Nukem GmbH, Basic and detail engineering process element fabrication plant, Nukem VT - No. 20080.
5. Donald C Stewart, Handling Radioactivity, a Practical Approach for Scientists and Engineers, John Wiley and Son's Inc. (1981).
6. American Nuclear Society, A.N.S For nuclear criticality safety in operations with fissionable materials outside reactors, ANS- 8.1/N 16.1 (1975).
7. American Nuclear Society, Guide for nuclear criticality safety in the storage of fissile materials, Draft ANS-8.7/N 16.5
8. Thomas J.T., Nuclear safety guide TID 7016 Rev.2, Union Carbide Corporation, Nuclear Division (June 1978)
9. Williams, H.T. et al., Safety analysis of enriched uranium processing TID 4500, 15<sup>th</sup> ed.
10. PEBN., Laporan analisis keselamatan IPEBRR Rev 1
11. Clark, H.K., Handbook of Nuclear Safety

1. Kebocoran larutan ke dalam bejana yang tidak aman: dengan pengontrolan secara visual serta pemakaian bejana yang aman maka hal ini tak akan terjadi.
2. Refleksi neutron dari personel: pembatasan personel yang masuk areal gudang harus terkontrol.
3. Pindahkan posisi aman ke tidak aman ; setiap pemindahan posisi harus ada penanggung jawabnya dengan memperhatikan batasan yang telah ditetapkan.
4. Terlewatnya batasan konsentrasi: dilakukan dengan melakukan analisis setiap larutan yang akan disimpan atau dimasukkan dalam drum.

Di samping pentingnya kontrol administrasi maka dalam fasilitas yang mengolah bahan fisil melebihi ketentuan harus ada bagian yang memberi persetujuan apabila diadakan perubahan terhadap alat yang digunakan dalam kaitannya dengan keselamatan kritikalitas. Setiap unit alat harus dilengkapi dengan kartu kontrol kritikalitas

#### KESIMPULAN

Dari uraian dalam pembahasan terlihat bahwa gudang uranium IPEBRR telah memenuhi syarat sebagai penyimpan bahan fisil yaitu U-235 dengan faktor keamanan yang cukup tinggi. Bahaya kritikalitas tak akan terjadi selama batasan dan ketentuan yang ada dipatuhi. Untuk itu perlu perlakuan kontrol administrasi berkenaan dengan keselamatan kritikalitas.