
Perhitungan biaya dismantling reaktor TRIGA Mark II-Bandung dalam daerah terkontrol

Mulyono Daryoko

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, BATAN

*e-mail: daryoko@batan.go.id

Abstrak

Telah dilakukan studi perkiraan biaya *dismantling* reaktor Triga Mark II, Bandung dalam daerah terkontrol. Studi ini adalah salah satu item dari ISDC (*International Structure for Decommissioning Costing*). Tingkatan ISDC dibagi menjadi 3 level, dimana level 1 merupakan pokok kegiatan, yang ditulis dalam 2 digit, level kedua merupakan grup kegiatan yang ditulis dalam 6 digit dan level ketiga merupakan jenis kegiatan yang ditulis dalam 6 digit pula. Dari keseluruhan jenis kegiatan tersebut akan didapatkan biaya yang masing-masing bisa dirinci dalam 4 katagori: yaitu biaya tenaga, biaya investasi, pengeluaran umum dan pengeluaran tak terduga. Perkiraan, biaya *dismantling* dimulai dari komponen inti reaktor dan sekitarnya, kemudian diperluas dengan komponen-komponen berikutnya. Dari studi ini bisa disimpulkan bahwa perkiraan biaya dismantling pada daerah terkontrol yang harus disediakan adalah Rp. 24.000.000.000,- (dua puluh empat milyar rupiah). Biaya *dismantling* pada daerah terkontrol tersebut didistribusikan pada ISDC.

Kata kunci: dismantling, reaktor Triga Mark II, ISDC, biaya.

ABSTRACT

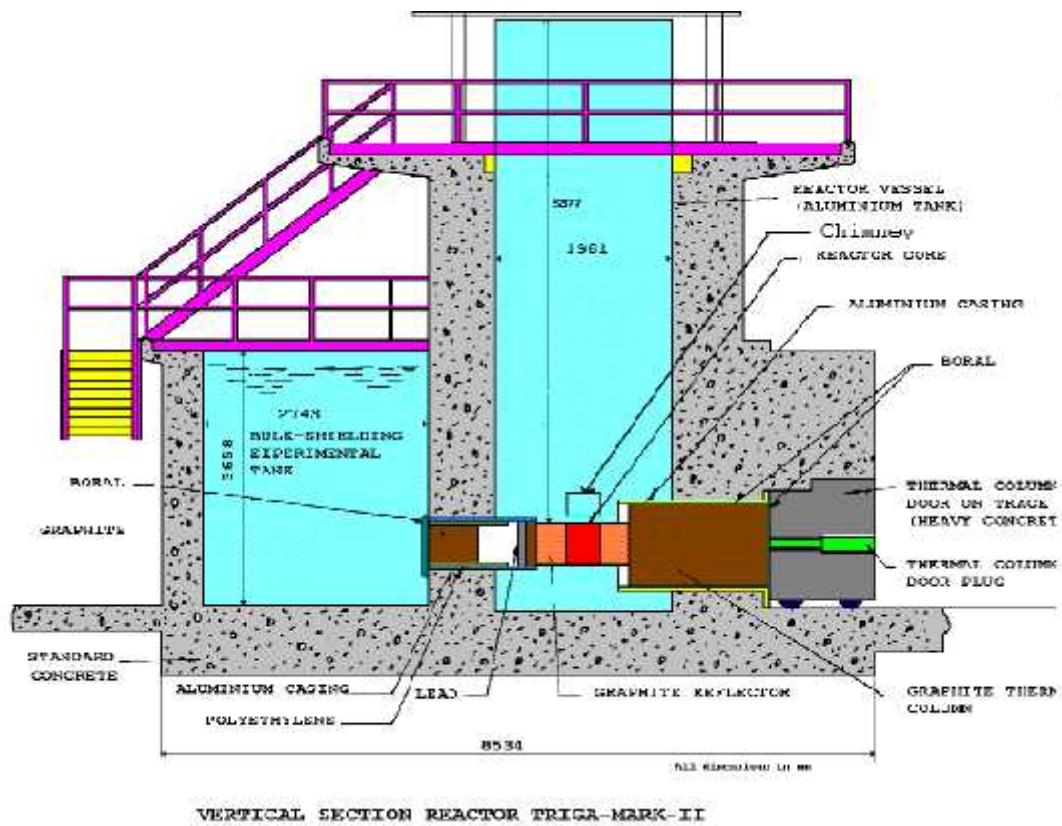
Cost calculation study was conducted for dismantling for Triga Mark II reactor, Bandung in the controlled area. This study is one of the items of the ISDC (International Structure for Decommissioning Cost). ISDC hierarchy is divided into 3 levels, where level 1 is the principal activity, which is written in 2 digits, the second level is a group activity that is written in 6 digits, and the third level is the type of activity that is written in 6 digits anyway. The overall types of activities will be available, each of which costs can be broken down into 4 categories: namely labor costs, investment costs, general expenses and unexpected expenses. The estimated dismantling cost began from the reactor core and its surrounding components, and then expanded to the other components. From this study it can be concluded that the estimated cost of dismantling the reasonable control area provided is Rp.24,000,000,000,- (twenty-for billion rupiah). These costs are distributed at ISDC.

Keywords: dismantling, Triga Mark II reactor, ISDC, cost.

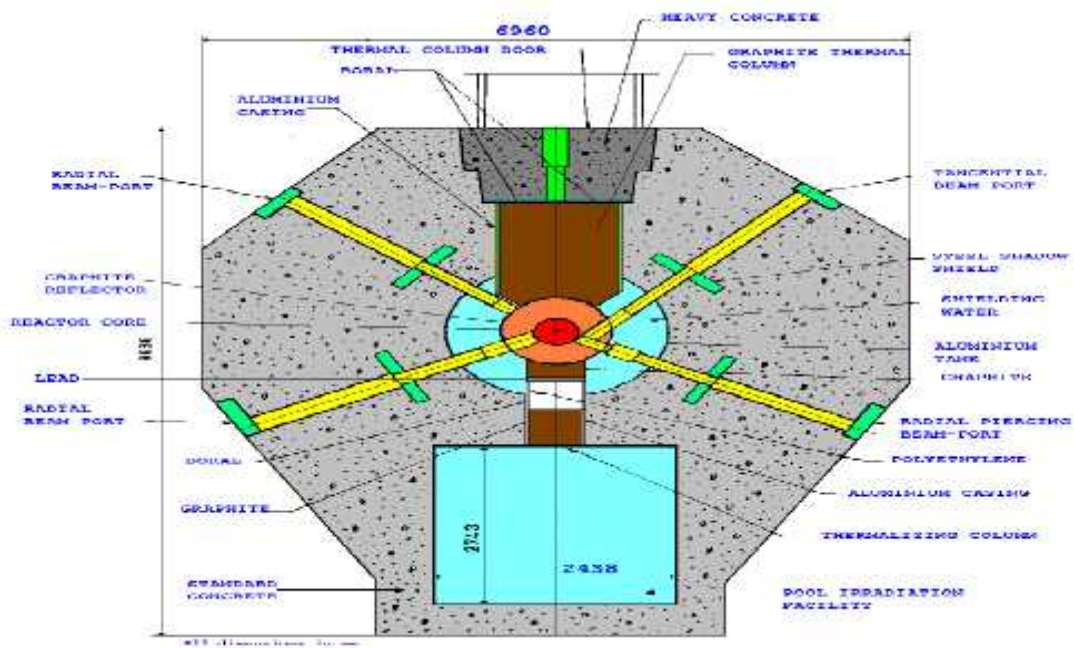
1. Pendahuluan

Reaktor Triga Mark II Bandung (irisannya vertikal dan horizontalnya dapat dilihat pada Gb. 1 dan 2) mulai dioperasikan pada tahun 1965 pada daya 250 kW. Pada tahun 1971 daya reaktor ditingkatkan menjadi 1000 kW dan dioperasikan pada tahun 1971 sampai dengan 1966. Pada tahun 1996 operasi reaktor dihentikan dan ditingkatkan kembali dayanya menjadi 2000 kW pada tahun 2000

[1,2]. Komisioning reaktor TRIGA Mark II dilakukan pada tahun 2001 dengan perpanjangan izin operasi hingga tahun 2016. Reaktor tersebut cepat atau lambat harus menyiapkan perencanaan dekomisioningnya. Oleh karena itu Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) harus menyiapkan perencanaan dekomisioningnya dan biaya yang dibutuhkan untuk keperluan tersebut.



Gb. 1. Reaktor Triga Mark II Bandung (irisan vertikal).



Gb. 2. Reaktor Triga Mark II Bandung (irisan mendatar).

Secara umum dekomisioning didefinisikan sebagai rangkaian tindakan yang dilakukan pada akhir usia pemanfaatan suatu fasilitas nuklir, atau suatu rangkaian proses yang dilakukan untuk penghentian beroperasinya suatu instalasi nuklir secara tetap. Dekomisioning dilakukan dalam rangka penghentian dari pelayanannya dengan mempertimbangkan kesehatan dan keselamatan para pekerja, masyarakat umum dan lingkungan hidup baik masa sekarang maupun masa yang akan datang. Kegiatan dekomisioning reaktor nuklir antara lain pemindahan bahan bakar nuklir dari teras reaktor, dekontaminasi dan dismantling komponen reaktor, pembongkaran (*demolition*) struktur bangunan reaktor, pengelolaan limbah dan disposal, serta pengamanan akhir tapak [3].

Salah satu hal yang sangat berpengaruh pada biaya dekomisioning adalah strategi dekomisioning, yaitu apakah *immediate dismantling*, *long term storage* atau *entombment*. Dengan gambaran perbandingannya sebagai berikut [3]:

Immediate dismantling

- Segera dilakukan dismantling seluruh komponen reaktor dan penunjangnya hingga menjadi *green field* (± 5 tahun)
- Segera bisa digunakan kembali
- Untuk fasilitas nuklir/reaktor yang kecil, lebih menguntungkan
- Segera bebas dari biaya *maintenance* dan *surveillance*
- Biaya pengelolaan limbah dan disposal lebih besar.

Long term storage

- Disimpan untuk menunggu peluruhan, fasilitas didiamkan hingga 150 tahun
- Paparan radiasi sudah sangat kecil, para pekerja sangat aman
- Jumlah dan aktivitas radionuklida lebih kecil, biaya pengelolaan limbah lebih kecil
- Diperlukan biaya *maintenance* dan *surveillance*
- Selalu diperlukan *liability*
- Para ahli mantan operator sudah tidak aktif

- Tidak bisa segera digunakan untuk fasilitas nuklir yang lain
- Biasanya untuk fasilitas nuklir yang besar.

Entombment

- Struktur reaktor disungkup dalam material yang stabil (misalnya *concrete*)
- Dibiarkan hingga tingkat aman
- Disposal *in situ*, tidak diperlukan biaya pengelolaan limbah dan disposal
- Tidak bisa digunakan kembali
- Biaya *maintenance* dan *liability* yang sangat panjang, bisa menjadi persoalan.

Berdasarkan pertimbangan biaya tersebut, maka strategi dekomisioning yang dipilih adalah dekomisioning segera, karena untuk reaktor kecil seperti reaktor Triga Mark II Bandung secara keseluruhan biaya dekomisioning akan jauh lebih murah. Disamping itu para ilmuwan serta operator yang berkecimpung dalam bidang Reaktor Triga Mark II masih aktif bekerja atau belum pensiun sehingga tidak membebani generasi yang akan datang.

Dismantling reaktor Triga Mark II adalah pembongkaran atau pelepasan struktur dari suatu sistem atau bagian-bagiannya dari reaktor Triga Mark II. Untuk maksud tersebut diperlukan inventarisasi radionuklida yang terkandung pada material-material utama, yang terletak pada inti reaktor dan sekitarnya (reflektor, *thermal column*, *thermalizing column*, *biological shielding*, *Control Rod Column*, *Detector Column*, *Grid Plate*, *Supporting Core*, *Supporting Leg Thermal Column Core*, Tangki Reaktor, *Lazy Susan*, *Beam Port*). Lingkungan dari material utama ini harus dikendalikan dari paparan radiasi, maka daerah ini disebut daerah terkontrol.

Biaya ini kemudian disajikan dalam bentuk *International Structure for Decommissioning Costing* (ISDC) [4]. Hirarki ISDC dibagi menjadi 3 level, dimana level 1 merupakan pokok kegiatan, yang ditulis dalam 2 digit, level kedua merupakan grup kegiatan yang ditulis dalam 6 digit dan level ketiga merupakan jenis kegiatan yang ditulis dalam 6 digit pula. Dari keseluruhan jenis kegiatan tersebut akan didapatkan biaya yang masing-

masing bisa dirinci dalam 4 katagori: yaitu beaya tenaga, biaya investasi, pengeluaran umum dan pengeluaran tak terduga [4,5,6]. Perkiraan beaya dismantling dimulai dari komponen inti reaktor dan sekitarnya, kemudian diperluas dengan komponen-komponen berikutnya [7,8,9]].

2. Metodologi

Dalam perhitungan *dismantling* reaktor Triga Mark II Bandung dalam daerah terkontrol ini terlebih dulu perlu dilakukan inventarisasi radionuklida. Inventarisasi ini untuk mendapatkan jumlah dan aktivitas radionuklida dari masing-masing komponennya. Konsentrasi radionuklida sebagai fungsi waktu dalam teras reaktor nuklir dapat dinyatakan dengan persamaan diferensial non homogen orde satu [10].

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^N l_{ij} \lambda_j X_j + \phi \sum_{k=1}^N f_{ik} \sigma_k X_k - (\lambda_i + \phi \sigma_i + r_i) X_i + F_i \quad (1)$$

Dimana:

- c_i adalah kerapatan atom nuklida i
- N adalah jumlah nuklida
- l_{ij} adalah fraksi disintegrasi radioaktif, pembentukan nuklida j menjadi nuklida i
- λ_i adalah konstante peluruhan radioaktif nuklida i
- f adalah fluks neutron rata-rata
- f_{ik} adalah fraksi serapan neutron nuklida k menjadi nuklida i
- s_k adalah spektrum serapan neutron rerata nuklida k
- r_i adalah laju *removal* nuklida i dari sistem
- F_i adalah laju umpan nuklida i

Dalam sistem homogen berlaku :

$$\dot{X} = A X \quad (2)$$

dimana

C = derivasi terhadap waktu konsentrasi nuklida (vektor kolom)

A = matrik transisi nuklida

X = konsentrasi nuklida (vektor kolom)
Persamaan ini mempunya solusi :

$$X(t) = e^{At} X(0) \quad (3)$$

Dimana :

$X(t)$ adalah konsentrasi nuklida pada saat t

$X(0)$ adalah vektor konsentrasi nuklida mulamula

T adalah waktu pada akhir step/langkah perhitungan

Penentuan konsentrasi radionuklida menggunakan *software Origen 2*. Selanjutnya biaya dismantling pada daerah terkontrol bisa dihitung. Kemudian biaya dismantling ini didistribusikan pada ISDC menggunakan *software Standardised Listing of Cost Items for Decommissioning of Costing Cerrex* [5]. CERREX adalah kependekakan dari *Cost Estimation for Research Reactors in Excel*, dimana salah satu dukungan IAEA untuk melakukan dekommissioning reactor riset diseluruh dunia [5].

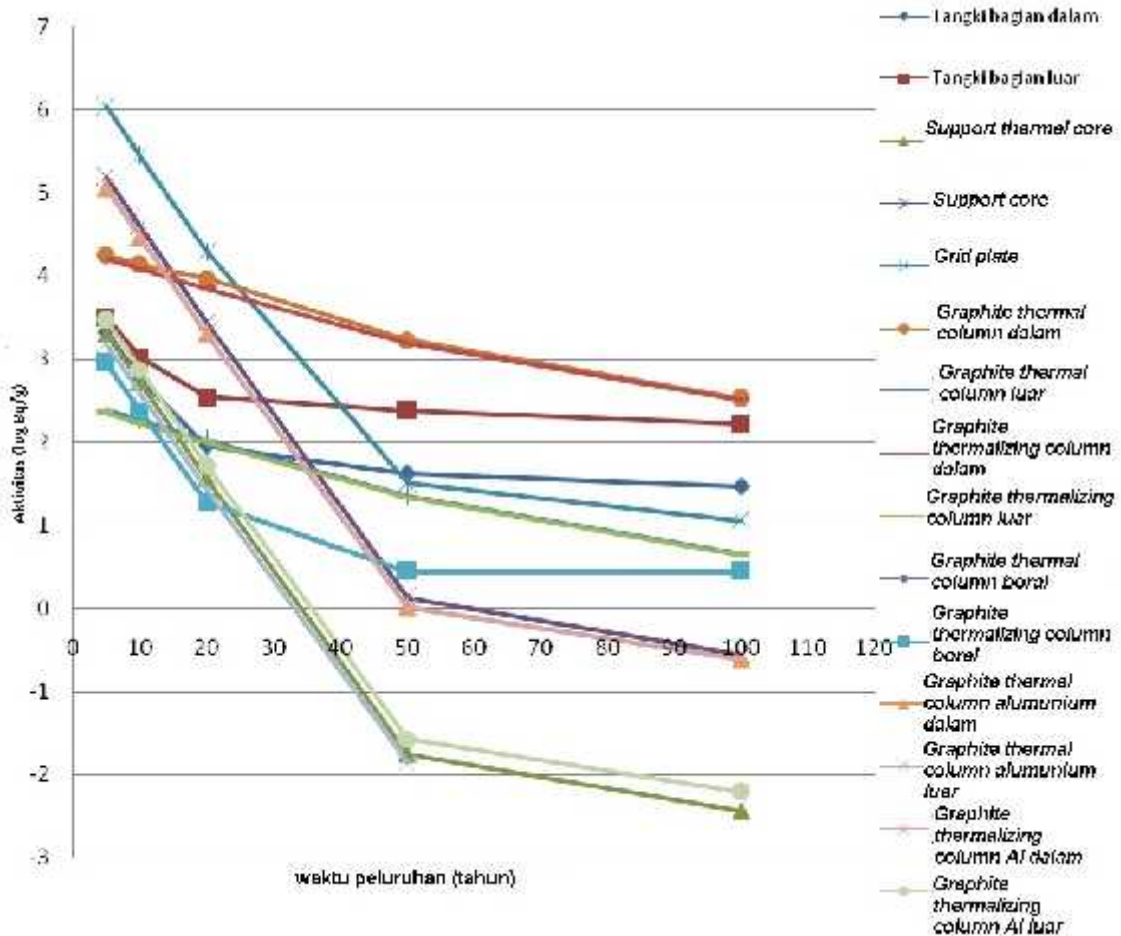
3. Hasil dan pembahasan

Inventarisasi radionuklida pada komponen-komponen pada daerah terkontrol ini bisa dilihat pada Gb. 2 [11]. Absis dari grafik tersebut menunjukkan waktu peluruhan (dalam tahun), sedangkan ordinatnya adalah aktivitas radionuklida (dalam Bq/g) pada masing-masing komponennya. Jumlah dan aktivitas radionuklida seluruh komponen adalah penjumlahan dari itu. Pada Tabel 1 menunjukkan kuantitannya dalam kg dan dalam liter [11]. Reflektor berfungsi untuk mereflek-sikan flux ke arah column (*thermal column* dan *thermalizing column*). Reflektor reaktor Triga Mark II Bandung yang sekarang terpasang dimulai pemakaiannya sejak reaktor di*upgrade* pada tahun 2001 dengan daya 2 MW, sedangkan reflektor yang lalu digunakan sejak tahun 1971 sampai dengan tahun 1996, dengan daya 1 MW. Kandungan radionuklida yang terdapat di dalam reflektor adalah H-3, C-14, Fe-55, Co-60, Eu-152 dan Eu-154, dengan jumlah 5,46 Ci dan 4,8 Ci.

Kandungan radionuklida pada lapisan aluminium adalah Al-28, Fe-55, Co-60, Ni-63 dan Zn-65, dengan aktivitasnya 0,3 Ci, sedangkan lapisan borat adalah Cl-36, K-40 dan Fe-55 dan aktivitasnya $2,8 \cdot 10^{-3}$ Ci. Kandungan radionuklida pada *thermal column* dan *thermalizing column* sama dengan yang terdapat pada reflektor, demikian pula lapisan aluminiumnya. Inventarisasi radionuklida pada *biological shielding* adalah Fe-55, Co-60, Ni-63, Nb-94, Ba-133, Eu-152 dan Eu-154, dengan jumlah aktivitas jenis kurang lebih $1,47 \cdot 10^3$ Bq/g. Kandungan radionuklida yang terkandung di dalam tangki reaktor adalah Fe-55, Ni-59, Ni-65, Zn-65 dengan jumlah aktivitas jenis $2,49 \cdot 10^3$ Bq/g.

Pada *Lazy Susan Lazy Susan-A1 250 kW* adalah Fe-55 dengan jumlah aktivitas jenis $3,61 \cdot 10$ Bq/g, sedangkan aktivitas jenis $2,98 \cdot 10^8$ Bq/g. Untuk *BeamPort* kandungan radionuklida nya adalah Fe-55, Co-60, Ni-63

dengan jumlah aktivitas jenis 9,6 Bq/g. Inventarisasi radionuklida pada Control Rod Column dan Detector Control Rod Control Rod Column adalah Fe-55, Co-60, Ni-63, dengan jumlah aktivitas jenis $9,61 \cdot 10^6$ Bq/g. Inventarisasi radionuklida pada Grid Plate Core, Supporting Core dan Supporting Thermal Leg Core adalah Fe-55, Co-60, Ni-63, dengan jumlah aktivitas jenis $1,08 \cdot 10^6$ Bq/g. Kandungan radionuklida yang terkandung di dalam Supporting Core adalah Fe-55, Co-60, Ni-63, dengan jumlah aktivitas jenis $1,55 \cdot 10^5$ Bq/g, dan kandungan radionuklida yang terkandung di dalam Supporting Thermal Leg Core reaktor setelah 5 tahun shut down adalah Fe-55 dengan jumlah aktivitas jenis $2,00 \cdot 10^3$ Bq. Tabel 2 menunjukkan biayanya yang dihitung berdasarkan harga satuan pada pustaka 11.



Gb. 3. Inventarisasi aktivitas radionuklida terhadap waktu peluruhan pada komponen utama.

Tabel 1. Perhitungan kuantita (berat/volume dan aktivitas radionuklida pada daerah terkontrol

Komponen	Akt. Sangat rendah		Akt. rendah		Akt. sedang		Jumlah	
	Berat,kg	Volume, liter	kg	liter	kg	liter	kg	liter
Grafit	8148	4074	2796	1398	-	-	10944	5472
Aluminium	243	90	3036	1494	-	-	3279	4584
Boral	486	54	472	52	-	-	858	106
Baja	-	-	-	-	-	-	-	-
Baja thn krt	-	-	91	8,9	-	-	91	8,9
Beton	212.000	88.886	106.000	44.443	-	-	318.000	133.329

Tabel 2. Perhitungan biaya dekomisioning komponen pada daerah terkontrol

No	Komponen	Berat (kg)	Volume (liter)	Aktivitas (Ci)	Satuan biaya(rupiah)[5]	Beaya (rupiah)
1	<i>Reflector</i> Grafit	2140	1070	5,46 Ci	73.000	176.295.000
		275	76	4,8 Ci		
2	<i>Thermal Column</i> Grafit	5300	2304	0,38 Ci	73.000	461.141.000
	Aluminium	567	210	0,3 Ci		
	Boral	450	50	$2,8 \cdot 10^{-3}$ Ci		
3	<i>Thermalizing Column</i> Grafit	61	700	0,3 Ci	73.000	29.126.000
	Aluminium	189	70	0,38 Ci		
	Boral	12	4	$1,88 \cdot 10^{-5}$ Ci		
4	<i>Biological Shielding</i>	106.000	44.443	$1,47 \cdot 10^3$ Bq/g	73.000	7.738.000.000
	<i>Biological Shielding</i>	212.000		$1,48 \cdot 10^{-1}$		15.476.000.000
5	Tangki Reaktor	2280	473.82	$2,32 \times 10^{-2}$ Ci	73.000	166.440.000
6	<i>Lazy Susan</i>	65	24,089	1,26 Ci	73.000	4.745.000
7	<i>Biimport</i>	19	7,124	$1,26 \text{ E-}6$ Ci	73.000	1.387.000
8	<i>Detector column</i>	35	13,20	0,66 Ci	73.000	2.555.000
9	<i>Controlle rod</i>	12	0,951	0,14 Ci	73.000	876.000
10	<i>Grid plate</i>	25	9.2121	0.347 Ci	73.000	1.825.000
	jumlah	329.430	524151			24.000.000



Gb.4. Struktur software CERREX.

Tabel 3 menunjukkan biayanya yang dihitung menggunakan software CERREX. Pendekatan perhitungan menggunakan CERREX. dimana ISDC sebagai *check list* kegiatan dekommissioning, pengguna software mengidentifikasi aktivitas yang relevan dengan perhitungan biaya. Jenis kegiatan utama dekomissioning dialokasikan sebagai item-item ISDC Struktur CERREX. ditunjukkan pada Gambar 3. Pembagian distribusinya dalam struktur ISDC adalah:

1. Perbandingan biaya-biaya tenaga: biaya modal: biaya umum: biaya tak terduga adalah 68: 8: 15: 9 [11]. Karena biaya modal telah dikeluarkan tersendiri, maka biaya-biaya tenaga: biaya modal: biaya umum: biaya tak terduga adalah 70: 18: 12.
2. Kegiatan dismantling pada daerah terkontrol adalah yang paling dominan dari seluruh kegiatan dekomissioning ini[11,12].

Tabel 3. Biaya dismantling dengan struktur ISDC.

Lvl	2	3	Aktivitas	beaya tenaga, rupiah	milyar	beaya modal, rupiah	beaya umum, rupiah	beaya tak terduga, rupiah	Beaya total, miliar rupiah	Keterangan
04			Kegiatan dismantling dalam area terkontrol							
	040100		Pengadaan peralatan dekontaminasi dan dismantling			6,500			6,500	
		040101	Pengadaan umum peralatan dismantling in situ							
		040102	Pengadaan							

	peralatan untuk dekontaminasi personil				
040103	Pengadaan alat khusus utk dismantling sistem reaktor				
040104	Pengadaan alat khusus dismantling komponen lain atau struktur				
040200	Persiapan dan dukungan untuk dismantling	0,350	0,090	0,060	0,500
040201	Dekonfigurasi servis fasilitas dan lokasi utk mendukung dismantling				
040202	Persiapan infrastruktur dan logistik utk dismantling				
040203	Karakteristik radiologi selama dismantling				
040300	Dekontaminasi pra dismantling	1,400	0,360	0,240	2,000
040301	Drainase sistem yg tersisa				
040302	Penghapusan lumpur dan produk dari sistem yg tersisa				
040303	Dekontaminasi dari sistem yg tersisa				
040304	Dekontaminasi daerah dlm bangunan				
040400	Penghapusan bahan yg memerlukan prosedur khusus	0,350	0,090	0,060	0,500
040401	Penghapusan isolasi thermal				
040402	Penghapusan asbes				
840403	Penghapusan				

040500	bahan berbahaya lainnya Dismantling	7,700	2,000	1,300	11,000
	proses utama sistem struktur dan komponen				
040501	Dismantling inti reaktor	0,500			
040502	Dismantling tangki reaktor dan komponen inti lainnya				
040503	Dismantling loop primer lainnya	0,500			
040504	Dismantling proses utama sistem	6,200			
040505	Dismantling dr eksternal /perisai biologis	0,500			
040600	Dismantling sistem dan komponen lainnya	1,400	0,360	0,240	2,000
040601	Dismantling sistem tambahan				
040502	Dismantling komponen yg tersisa				
040700	Penghapusan kontaminasi dari struktur bangunan	0,350	0,090	0,060	0,500
040701	Penghapusan elemen tertanam dan bangunan				
040702	Penghapusan srtuktur terkontaminasi				
040703	Dekontaminasi i bangunan				
040800	Penghapusan kontaminasi dari luar bangunan	0,350	0,090	0,060	0,500
040801	Penghapusan pipa dan struktur terkontaminasi bawah tanah				
040802	Penghapusan tanah yg terkontaminasi				

040900	dan barang2 lain yg terkontaminasi Survy	0,350	0,090	0,060	0,500
040901	radioaktivitas akhir untuk rilis bangunan Survai				
040902	radioaktivitas final bangunan Deklarasi bangunan				
	jumlah				24,000

4. Kesimpulan

Perkiraan biaya dismantling pada area terkontrol reaktor Triga Mark II didapat dari jumlah radionuklida yang ada di dalamnya. Perkiraan ini kemudian didistribusikan pada struktur ISDC. Biaya yang dibutuhkan dalam dismantling reaktor Triga Mark II pada daerah terkontrol ini adalah Rp. 24.000.000.000,-. Biaya ini didistribusikan pada ISDC.

Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada KaBag TU PTLR yang telah memberikan saran dalam perbaikan makalah ini.

Daftar pustaka

1. Anonymous, International Atomic Energy Agency, *Research Reactor Modernization and Refurbishment, Upgrade of the Bandung Triga 2000 Reactor*, IAEA-TECDOC-1625, Vienna, 2009.
2. Anonymous, *Reaktor Triga 2000 Bandung*, Available: <http://airamadhan.wordpress.com/2008/05/27/reaktor-triga-2000-bandung/> diakses pada 7 November 2011.
3. Anonymous, International Atomic Energy Agency, *Decommissioning Techniques for Research Reactor*, Final Report of a Coordinated Research Project, 1997-2001, IAEA-TECDOC-1273, Vienna, 2002.
4. Anonymous, International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations, ISBN 978-92-64-99173-6, OECD 2012 NEA No. 7088, Nuclear Energy Agency Organisation Economic Co-operation and Development, 2012.
5. V. Daniska and M. Zachar, *Standardised Listing of Cost Items for Decommissioning of Costing Cerrex Software*, IAEA Group Science Visit, IAEA, 2011.
6. V. Daniska, M. Laraia and O. Sullivan, *Implementation of the International Structure for Decommissioning Costing Related IAEA Project*, IAEA 2011.
7. I. Andersson, S. Backe, K. Iversen, et al., *Rolf Sjoblem Cost Calculation for Decommissioning and Dismantling of Nuclear Research Facilities Phase 1, NKS-146*, ISBN 87-7893-2009-2, Nordic Nuclear Safety Research, Denmark, 2006.
8. S. J. Kim, *Plan for Moata Reactor Decommissioning*, Australian Nuclear Science and Technology Organization (ANSTO), Australia, 1995.
9. Anonymous, *Cost Control Guide for Decommissioning of Nuclear Installations*, Organization for Economic Cooperation and Development Committee, VM 2013 Conference, February, Australia, 2013.
10. Anonymous, ORNL, *RSICC Computer Code Collection Origen 2.1*, ORNL, 1980.
11. M. Daryoko, S. Sutoto, A. Aisyah, et al., *Perhitungan Perkiraan Biaya Pengelolaan Limbah pada Perencanaan Dekomisioning Reaktor Triga Mark II Bandung*, Program Insentif Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perekayasa Tahun 2012, Pusat

- Teknologi Limbah Radioaktif, BATAN, 2012.
12. Anonymous, International Atomic Energy Agency, *Decommissioning Cost Of WWER-440 Nuclear Power Plant*, IAEA-TECDOC-1322, Vienna, 2002.
13. O. Anunti, H. Lersson and M. Ederborg, *Decommissioning Study of NPP*, Westing House Electric, Sweden AB, 2013.