

---

**EXTERNAL EVENTS  
DARI REAKTOR RISET MENUJU REAKTOR DAYA**

**Sindur P. Mangkoesobroto<sup>1</sup>, Henky Poedjo Rahardjo<sup>2</sup>,  
Irwan Kurniawan<sup>3</sup>, Rizkita Parithusta<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Institut Teknologi Bandung,

<sup>2</sup> Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri - BATAN,

<sup>3</sup> Indonesian Centre for Earthquake Engineering,

<sup>4</sup> Badan Meteorologi dan Geofisika

**ABSTRAK**

**EXTERNAL EVENTS DARI REAKTOR RISET MENUJU REAKTOR DAYA.**

Krisis energi yang dialami oleh Indonesia belakangan ini memerlukan adanya alternatif pembangkit listrik dengan energi terbarukan dan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) merupakan salah satu pilihan yang dapat dipertimbangkan. Standar keselamatan dan keamanan secara internasional perlu diterapkan termasuk di dalamnya standar untuk mengatasi kejadian-kejadian eksternal (*external events*). Di Indonesia terdapat tiga reaktor nuklir riset yaitu reaktor Kartini di Yogyakarta, Reaktor TRIGA 2000 di Bandung, dan Reaktor GA Siwabessy di Serpong. Untuk menuju ke PLTN maka perlu diperhatikan pengalaman yang diperoleh dari reaktor riset tersebut. Makalah ini memuat pengalaman dan kajian kejadian-kejadian eksternal (*external events*) sehubungan dengan kualifikasi dan re-evaluasi reaktor daya/ riset dengan studi kasus kajian kegempaan yang telah dilakukan pada Reaktor TRIGA 2000, Bandung. Kajian kegempaan terhadap Reaktor TRIGA 2000 dibagi menjadi tiga tahap, yaitu investigasi lapangan, analisis resiko kegempaan (PSHA), dan analisis struktur. Pengalaman Indonesia dalam hal kualifikasi dan re-evaluasi reaktor riset sangatlah berharga sebagai bekal dalam pengembangan reaktor daya. Falsafah pengembangan reaktor daya adalah sejalan dengan reaktor riset dalam hal kejadian-kejadian eksternal. Perbedaannya adalah dalam hal besaran-besaran kuantitatif *Performance Goal, Probability of Failure, Hazard Category, Safety* dan *Design Class*.

**Kata kunci :** analisis resiko kegempaan, kejadian-kejadian eksternal, reaktor nuklir, pembangkit listrik tenaga nuklir

**ABSTRACT**

**EXTERNAL EVENTS OF RESEARCH REACTOR TO POWER REACTOR.** The energy crisis, which has been experienced by Indonesia recently, requires an energy alternative as a part of the solution. Moreover, the nuclear power plant (NPP) as an energy source can be considered as one of the alternatives. The safety standard that has been recognized internationally should be implemented at any time, especially those regarding external events. In Indonesia, there are three research reactors, i.e. Kartini Reactor in Yogyakarta, TRIGA 2000 Reactor in Bandung and GA Siwabessy Reactor in Serpong. Based on these three, Indonesia has gained some

IAEA untuk reaktor nuklir perlu dikaji, dipahami, dan diimplementasikan sejak tahap awal termasuk di dalamnya standar untuk mengatasi kejadian-kejadian eksternal (*external events*). Oleh karena itu makalah ini dibuat dengan tujuan untuk memberikan gambaran awal standar keselamatan reaktor nuklir baik reaktor riset maupun reaktor daya terhadap kejadian-kejadian eksternal, diantaranya tumbukan pesawat terbang, ledakan bahan kimia, kebakaran, kebocoran gas/ cairan berbahaya, interferensi elektromagnetik, maupun diakibatkan oleh kejadian alam yaitu gempa bumi, liquifaksi, tanah longsor, hujan lebat, banjir, angin, tornado, petir, dan gunung berapi. Makalah ini lebih khusus membahas pengaruh kejadian gempa bumi/ seismik terhadap keamanan struktur gedung reaktor dengan studi kasus kajian kegempaan untuk struktur Reaktor TRIGA 2000 Bandung.

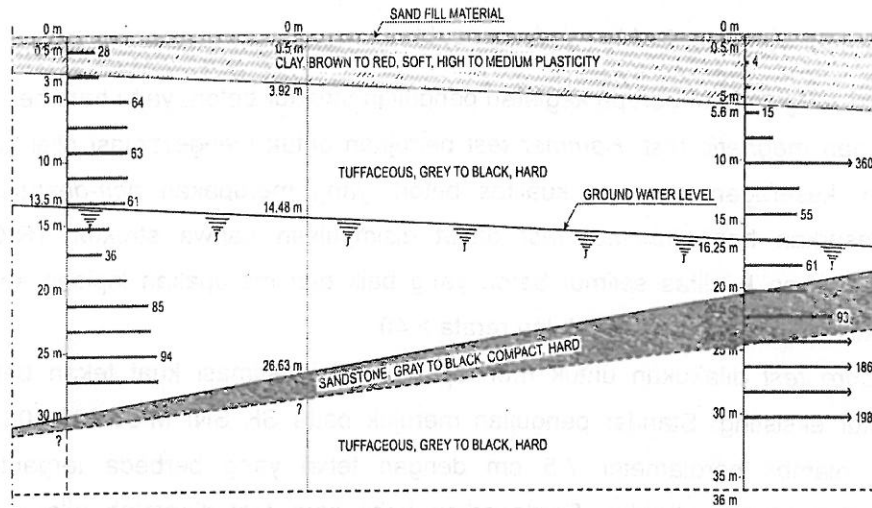
## II. ANALISIS SEISMIK REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG

Langkah-langkah yang telah dilakukan untuk melakukan kajian kegempaan terhadap struktur Reaktor TRIGA 2000 di Bandung secara garis besar dapat dibagi menjadi tiga tahap, yaitu investigasi lapangan, analisis resiko kegempaan, dan analisis struktur. Investigasi lapangan bertujuan untuk mengumpulkan data sekunder dan primer yang meliputi survei geoteknik, survei *seismic downhole*, penggambaran kembali struktur gedung reaktor, dan pengujian elemen struktur gedung. Analisis resiko kegempaan atau disebut *probabilistic seismic hazard analysis* (PSHA) bertujuan untuk mengetahui besar gempa yang terjadi secara spesifik di lokasi reaktor beserta periode ulangnya yang harus mampu dipikul oleh struktur. Sedangkan analisis struktur bertujuan untuk mengetahui respons serta perilaku struktur berdasarkan besaran gempa bumi yang telah ditentukan dan berdasarkan tahanan struktur yang ada. Kajian yang telah dilaksanakan beserta hasil yang diperoleh disajikan berikut ini.

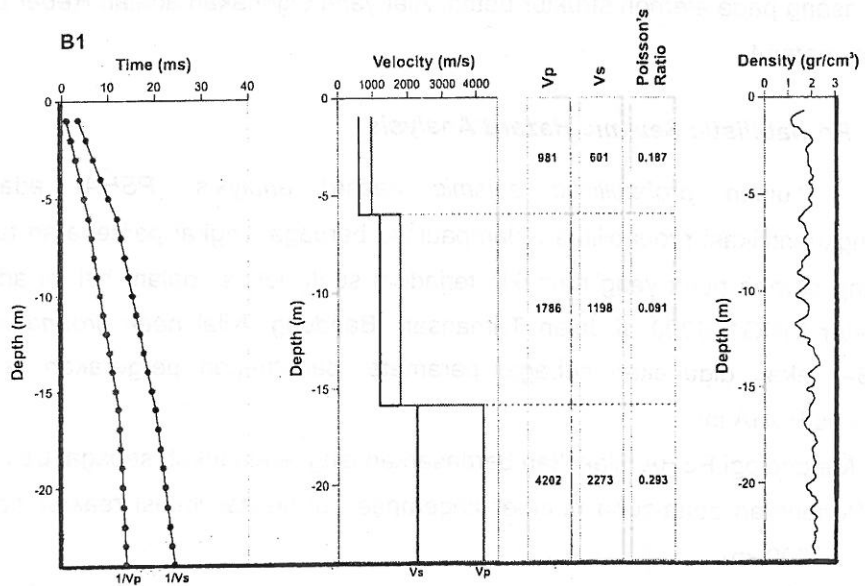
### II.1 Investigasi Lapangan

#### Survei geoteknik

Survei geoteknik dilakukan dengan melakukan pemboran inti (*continuous coring*) di tiga titik masing-masing hingga kedalaman 30 meter. Survei dilengkapi



Gambar 1. Penampang tanah di lokasi reaktor TRIGA 2000, Bandung.



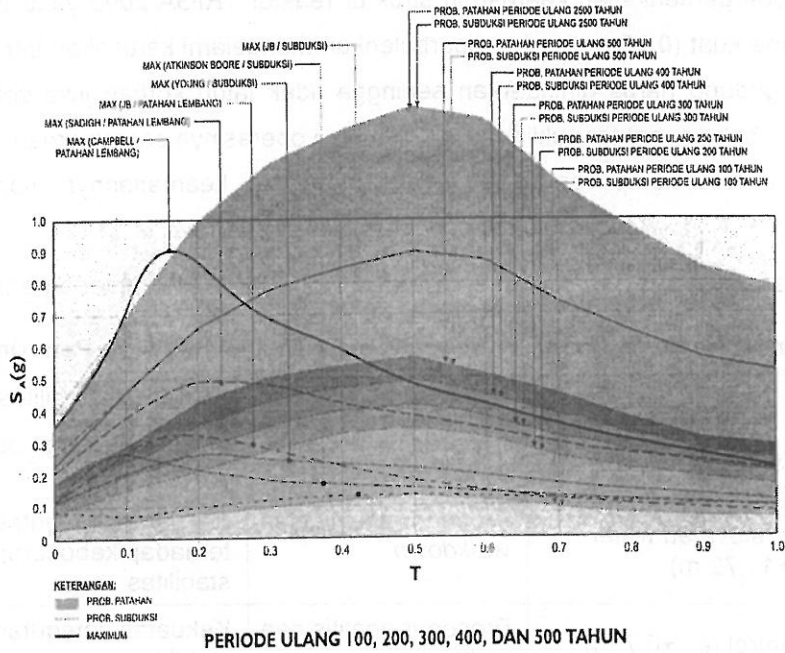
Gambar 2. Hasil seismic downhole test.

3. Penentuan persamaan atenuasi regional yang memformulasikan hubungan percepatan tanah di suatu lokasi terhadap magnitude dan jarak sumber gempa. Dalam analisis ini persamaan atenuasi yang digunakan adalah Abrahamson & Silva; Boore, Joyner & Fumal; Boore & Atkinson; Campbell & Bozorgnia; Campbell; Sadigh; Spudich; dan Young. Penggunaan persamaan atenuasi disesuaikan dengan zona sumber gempa yang ditinjau.
4. Perhitungan *probabilistic seismic hazard assesment* (PSHA).

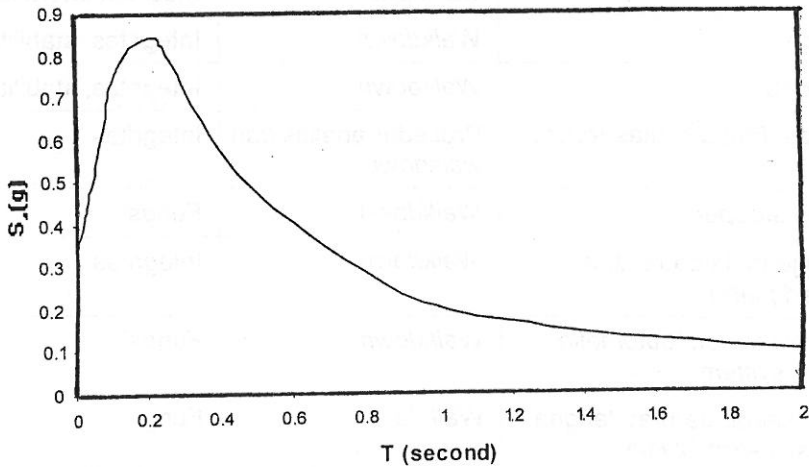
Metode tersebut dituangkan dalam bentuk *logic tree* sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3 dan Gambar 4 yang memperlihatkan *logic tree* untuk kasus subduksi dan untuk kasus patahan. Sedangkan katalog gempa yang digunakan dalam analisis ini adalah:

1. Arthur Witchman (0000-1857)
2. Badan Metereologi dan Geofisika (1800 – 2003)
3. International Seismological Center (ISC) (1900-2003)
4. National Earthquake Information Center (NEIC)
5. U.S. Geological Survey (1970 – 2003)
6. JISNET (1996 -2003)

Hasil kajian disajikan dalam bentuk kurva *uniform risk* sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 5. Spektra target dan nilai PGA maksimum diperoleh sebesar **0,35g** yang akan digunakan untuk lokasi reaktor TRIGA 2000 diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Kurva *uniform risk*



Gambar 6. Spektra target

M. <i>Strong motion accelerograph</i>	<i>Walkdown</i>	Fungsi
N. <i>Reactor pool</i>	Prosedur analitis	Kekuatan, stabilitas
O. <i>Reactor core platform</i>	<i>Walkdown</i> dan studi literatur	Stabilitas, integritas
P. Kolom pendukung platform	<i>Walkdown</i>	Kekuatan, stabilitas

Sedangkan definisi kriteria penerimaan keamanan struktur sebagaimana dimaksud pada Tabel 1 adalah sebagai berikut:

- Kekuatan: tahanan terhadap lentur, geser, aksial, torsi dan kombinasinya.
- Stabilitas: keruntuhan struktur secara katastropik.
- Integritas: kekakuan sambungan antara elemen struktur dan pengangkurannya.
- Integritas terhadap kebocoran: kehilangan air yang signifikan melalui kebocoran besar atau efek *sloshing*.
- Masalah interaksi: interaksi antara beberapa bagian atau komponen-komponen struktur.
- Fungsi: kinerja yang diharapkan dari peralatan, komponen, dan instrumen.

### **Artificial ground motion**

Berdasarkan spektra target yang telah ditetapkan (Gambar 6), dikembangkan enam buah *artificial ground motion* (AGM) berdasarkan enam buah gempa yaitu El Centro (1940), Mexico City (1995), San Fernando (1971), Denpasar (1980), Jayapura (1984), dan Sukabumi (1982). Mengingat keterbatasan ruang penulisan, pada Gambar 7 hanya diperlihatkan AGM berdasarkan gempa El Centro (1940) dan ke-lima AGM lainnya dapat dilihat pada referensi [1]. Ke-enam AGM ini selanjutnya dipacukan pada struktur untuk mensimulasikan perilaku struktur pada saat dikenai gempa kuat. Sedangkan pada Gambar 8 diperlihatkan kedekatan spektra percepatan ( $S_a'$ ), spektra kecepatan ( $S_v'$ ), dan spektra peralihan ( $S_d'$ ) untuk AGM El Centro (1940) terhadap masing-masing targetnya.

## Analisis struktur

Analisis struktur dilakukan dengan perangkat lunak *Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis (ADINA)* versi 8.2 – *under LINUX* yang dikembangkan oleh ADINA R & D, Inc. Pemodelan struktur dilakukan secara tiga dimensi dengan analisis transien nonlinear-metode Newmark yang diterapkan pada struktur *stack*, gedung reaktor, reservoir/ *elevated water tank* (el. +11,72 m), ruang kontrol dan *catwalk* (el. +6,7 m), dan *reactor pool*.

## Kombinasi pembebanan

Kombinasi pembebanan yang digunakan adalah

$$1*D + 1* E_x + 1*E_y - 0.75*E_z,$$

1\*D (100% beban mati),

1\*  $E_x$  (100% beban gempa arah X),

1\* $E_y$  (100% beban gempa arah Y),

0.75\* $E_z$  (75% beban gempa arah Z)

## Pemodelan dan hasil analisis *ventilation stack*

Struktur *stack* berupa menara beton bertulang dengan penampang prismatis. Tinggi menara adalah 22,6 m dimodelkan dengan elemen *Hermitian-beam* dengan hubungan momen-kurvatur ( $M-\phi$ ), gaya-regangan aksial ( $P-\epsilon$ ), dan torsi-twist ( $T-\phi$ ) sebagai data masukan pada ADINA. Batasan regangan beton tekan maksimum diambil 0,003. Hubungan konstitutif material beton digunakan model *modified Kent-Park* tipe *unconfined*.

Hasil analisis menunjukkan bahwa *stack* masih berperilaku elastik pada saat dikenai gempa kuat (0,35g). Gaya lentur, geser, torsi, aksial yang terjadi beserta kombinasinya masih berada di bawah tahanan yang dimiliki struktur *stack*.

## Pemodelan dan hasil analisis struktur gedung reaktor

Struktur gedung reaktor dimodelkan sebagai rangka terbuka dengan dinding geser (Gambar 9). Termasuk di dalam model tersebut adalah struktur atap (*folded*

Tabel 2. Hasil dan rekomendasi analisis seismik reaktor TRIGA 2000, Bandung.

SISTEM, STRUKTUR/ KOMPONEN	KESIMPULAN	REKOMENDASI TINDAK LANJUT DAN SEISMIC UPGRADING
A. Stack	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kapasitas lentur dan geser mencukupi.</li> <li>Berperilaku elastik pada saat dikenai gempa kuat.</li> </ul>	Tidak ada.
B. Gedung reaktor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Balok dan kolom beton bertulang:               <ol style="list-style-type: none"> <li>Terjadi plastifikasi pada balok dan kolom.</li> <li>Diperoleh nilai <math>V_u &gt; V_n</math> pada beberapa balok dan kolom.</li> </ol> </li> <li>Dinding beton bertulang: pada beberapa panel diperoleh tahanan/ kapasitas yang tidak mencukupi.</li> <li>Pelat beton bertulang: kapasitas mencukupi.</li> <li>Pelat atap <i>folded plate</i>:               <ol style="list-style-type: none"> <li>Kapasitas pelat beton bertulang mencukupi.</li> <li>Defleksi vertikal maksimum: 67,4 mm. Hal ini mengindikasikan perlunya perkuatan pada lampu-lampu khususnya yang berada di atas <i>reactor pool</i> (lihat butir H pada bagian ini).</li> </ol> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Balok dan kolom beton bertulang: perkuatan geser pada beberapa balok dan kolom.</li> <li>Dinding beton bertulang: perlu diperkuat.</li> </ul>
C. Reservoir/ <i>elevated water tank</i> (el. +11,72 m)	Kapasitas pelat beton bertulang mencukupi, namun perlu dilakukan upaya untuk menghindari retak pada beton guna mencegah air merembes ke luar.	Pemasangan balok baja untuk memperkaku pelat dasar reservoir dan mencegah terjadinya retak pada pelat.
D. Stack	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kapasitas lentur dan geser mencukupi.</li> <li>Berperilaku elastik pada saat dikenai gempa kuat.</li> </ul>	Tidak ada.
E. Gedung reaktor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Balok dan kolom beton bertulang:               <ol style="list-style-type: none"> <li>Terjadi plastifikasi pada balok dan kolom.</li> <li>Diperoleh nilai <math>V_u &gt; V_n</math> pada beberapa balok dan kolom.</li> </ol> </li> <li>Dinding beton bertulang: pada beberapa panel diperoleh tahanan/ kapasitas yang tidak mencukupi.</li> <li>Pelat beton bertulang: kapasitas mencukupi.</li> <li>Pelat atap <i>folded plate</i>:               <ol style="list-style-type: none"> <li>Kapasitas pelat beton bertulang mencukupi.</li> <li>Defleksi vertikal maksimum: 67,4 mm. Hal ini mengindikasikan perlunya perkuatan pada lampu-lampu khususnya yang berada di atas <i>reactor pool</i> (lihat butir H pada bagian ini).</li> </ol> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Balok dan kolom beton bertulang: perkuatan geser pada beberapa balok dan kolom.</li> <li>Dinding beton bertulang: perlu diperkuat.</li> </ul>
F. Reservoir/ <i>elevated water tank</i> (el. +11,72 m)	Kapasitas pelat beton bertulang mencukupi, namun perlu dilakukan upaya untuk menghindari retak pada beton guna mencegah air merembes ke luar.	Pemasangan balok baja untuk memperkaku pelat dasar reservoir dan mencegah terjadinya retak pada pelat.



Q. <i>Reactor pool</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kapasitas mencukupi.</li> <li>Perilaku: elastik pada saat dikenai gempa kuat.</li> </ul>	Tidak ada.
R. <i>Reactor core platform</i>	Stabilitas dan integritas mencukupi.	Tidak ada.
S. <i>Kolom pendukung platform</i>	Memerlukan perkuatan geser.	Perkuatan geser pada ¼ panjang kolom pada bagian ujung-ujung kolom.

#### IV. KASUS REAKTOR DAYA

Pada bagian terdahulu telah dibahas masalah re-evaluasi terhadap reaktor riset eksisting dengan contoh kasus Reaktor Riset TRIGA 2000 – Bandung. Untuk reaktor daya, Indonesia belum memiliki pengalaman sama sekali baik perihal kualifikasi apalagi terhadap re-evaluasi. Namun demikian, pengalaman Indonesia dalam hal kualifikasi dan re-evaluasi reaktor riset sangatlah berharga sebagai bekal dalam pengembangan reaktor daya; mengingat dalam beberapa hal bahkan reaktor riset bisa lebih kompleks daripada reaktor daya, karena reaktor riset dapat memiliki beberapa fungsi sekaligus, sedangkan reaktor daya umumnya memiliki fungsi utama untuk menghasilkan daya (listrik) saja. Falsafah pengembangan reaktor daya sejalan dengan yang telah dijelaskan sebelumnya untuk reaktor riset dalam hal kejadian-kejadian eksternal (*external events*). Perbedaannya adalah dalam hal besaran-besaran *Performance Goal*, *Probability of Failure*, *External Events* dan *Hazard Category*, serta *Safety* dan *Design Class*. Kajian dalam bagian ini sepenuhnya mengacu pada rujukan [4], [5] dan [6].

*Probability of Failure* atau PF adalah suatu konsep probabilitas yang menggambarkan peluang terjadinya kegagalan sistem, struktur dan komponen terpilih (*Selected Systems, Structures and Components* atau SSSCs) akibat terjadinya kejadian-kejadian eksternal (*external events* atau EE) dalam hal ini adalah gempa bumi. Mengingat adanya dua obyek dalam hal ini yaitu SSSC dan EE maka PF adalah fungsi dari kedua obyek tersebut. Secara matematik hubungan sederhana antara PF dan SSSC, EE ditulis sebagai berikut,

$$PF = P(SE, PGA) * P(SSSC, PGA) \leq \text{Performance Goal}$$

kokoh dan standar material atau konstruksi yang digunakan juga bisa lebih rendah, bahkan dalam beberapa hal dapat digunakan standar material atau bangunan biasa. Jadi sejatinya, masalah kualifikasi reaktor daya/ riset tidaklah terlalu rumit karena Pers. (1) merupakan landasan dalam mempertimbangkan keamanan operasi reaktor; yang menjadi kritis adalah dalam hal menetapkan angka-angka kuantitatifnya.

## V. KESIMPULAN

Pada makalah ini telah dipaparkan pengalaman dan kajian sehubungan dengan kejadian-kejadian eksternal (*external events*) sehubungan dengan kualifikasi dan re-evaluasi reaktor daya/ riset. Pengalaman kualifikasi dan re-evaluasi telah dimiliki Indonesia dalam hal reaktor riset. Pengalaman tersebut sangat berharga dalam meningkatkan diri untuk dapat melakukan kualifikasi reaktor daya. Konsep kualifikasi tidak serumit yang dibayangkan karena hal tersebut dapat dilakukan melalui 'permainan' Pers. (1). Hal yang lebih kritis adalah dalam hal menetapkan nilai kuantitatif dari *Performance Goal* yang akan menentukan ramifikasi selanjutnya. Penentuan nilai kuantitatif tersebut tidak saja dipengaruhi oleh sisi keamanan operasi reaktor namun juga kearifan, keberanian politik, kemampuan pendanaan, dan kepedulian masyarakat.

## VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Propenta Persisten Indonesia atas dukungan yang telah diberikan dalam membantu terselesaikannya penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

1. PROPENTA PERSISTEN INDONESIA, PT., (2005), "Seismic Evaluation of Nuclear Research Reactor's Building-National Nuclear Energy Agency-Bandung", PT PROPENTA PERSISTEN INDONESIA, Bandung.
2. PROPENTA PERSISTEN INDONESIA, PT., (2005), "Supplement of Seismic Evaluation of Nuclear Research Reactor's Building-National Nuclear Energy

- 
11. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2003), "Consideration of External Events in The Design of Nuclear Facilities Other than Nuclear Power Plants, with Emphasis on Earthquake", IAEA TECDOC-1347.
  12. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2003), "Seismic Evaluation of Existing Nuclear Power Plants", Safety Report Series No.28.
  13. STANDAR NASIONAL INDONESIA (2003),"Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung", SNI 03-1726-2003.
  14. STANDAR NASIONAL INDONESIA (2002),"Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung", SNI 03-2847-2002.