

PENGGUNAAN PASIR BESI DAN BARIT SEBAGAI AGREGAT BETON BERAT UNTUK PERISAI RADIASI SINAR GAMMA

Sri Sumarni

Fakultas KIP-Program Teknik Bangunan Universitas Sebelas Maret Surakarta
Jln. A. Yani No. 200 Pabelan Surakarta. e-mail: marnis_ri@yahoo.com.

Iman Satyarno

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Jln Grafika Yogyakarta

Agus Budhie Wijatna

Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada Yogyakarta Jln Grafika Yogyakarta

Abstract

Radiation Protection is a crucial aspect in controlling the impacts of radiation to environmental health. Therefore, every nuclear installation and radiology unit has to mainly prioritize the implementation of radiation protection to protect their workers and society surrounding the installation. High density concrete, composed of barite stone, iron sand and the additive substance of viscocrete-10, and made by preplaced method, is investigated in this research as shield material. The source of radiation used are the following gamma-ray: ^{152}Eu with the selected energy of 121,7824 keV, ^{131}I with the energy of 364,5 keV and ^{137}Cs with the energy of 661,6 keV. The quality examination of concrete with barite and iron sand comes up with the following results: a compression strength of 15,38 MPa and the specific gravity of 3,121 gr/cm³. The attenuation coefficient (μ) yielded the equation of $y = 0,6053e^{-0,0008x}$ that applies only for the energy radiation 121,7824 keV up to 661,6 keV. If this attenuation coefficient is compared to normal density concrete with specific gravity of 2,35 gr/cm³, the attenuation coefficient of high density concrete is higher, so that the radiation of shield thickness will be more efficient.

Keywords:

Attenuation Coefficient, Preplace Method, Shield Radiation, Viscocrete-10.

PENDAHULUAN

Proteksi radiasi merupakan aspek yang sangat penting dalam pengendalian bahaya kesehatan lingkungan akibat radiasi. Oleh karena itu setiap instalasi nuklir harus mengutamakan proteksi radiasi. Tujuan perlindungan radiasi untuk mengetahui dosis yang diterima pekerja dan masyarakat berada pada tingkat yang aman. *International Commission on Radiological Protection (ICRP)* menetapkan nilai batas dosis efektif untuk pekerja radiasi adalah 20 mSv/tahun dan untuk masyarakat 1 mSv/tahun. Untuk itu perisai radiasi memiliki peranan penting dalam melindungi pekerja dan masyarakat di sekitar instansi yang memanfaatkan radiasi pengion. (Akhadi, 2000).

Banyak material dapat digunakan sebagai bahan perisai radiasi. Hampir seluruh ruangan radiologi di Indonesia menggunakan timah hitam (Pb) sebagai bahan perisai radiasi, bahan ini sangat besar kemampuannya dalam memerisai radiasi yang ditimbulkan oleh pesawat-X dalam bidang

kedokteran, sehingga di luar ruangan radiologi dinyatakan aman terhadap radiasi, hanya penggunaan bahan timbal memerlukan pengerjaan khusus dan dari segi biaya harganya sangat mahal.

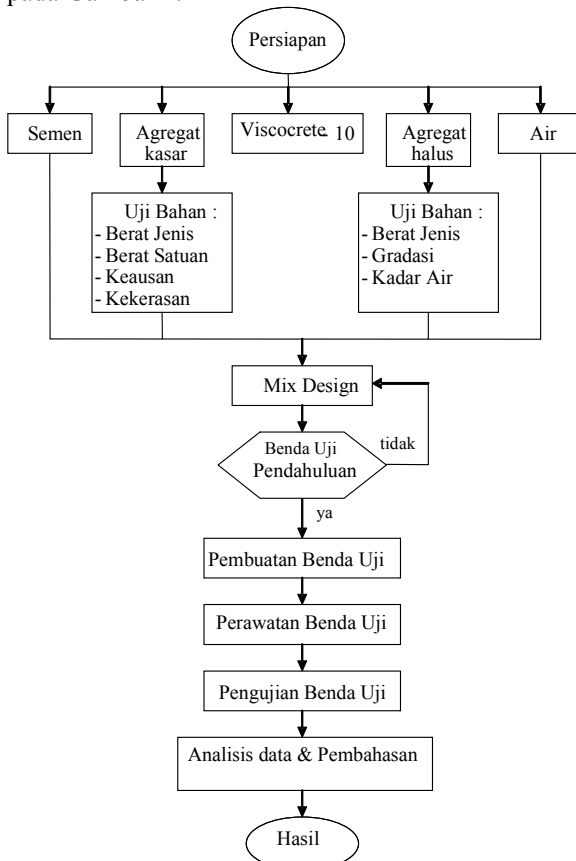
The National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) menyatakan material yang memiliki berat jenis dan nomor atom tinggi memiliki kemampuan menyerap berkas radiasi lebih baik. Salah satu material yang memenuhi persyaratan ini adalah beton densitas tinggi yang dapat diperoleh dengan menggunakan agregat yang mempunyai berat jenis tinggi. Agregat alami seperti magnetit, barit, limonit dan agregat buatan berupa butiran baja (*steelshot*), umum dipakai sebagai agregat beton perisai radiasi dalam struktur reaktor atom (Raju, 1983). Menurut Stephenson (1954), beton dengan agregat batu barit memiliki daya serap yang baik terhadap radiasi pengion karena barit mempunyai kandungan utama senyawa kimia barium sulfat (BaSO_4).

Persoalan yang perlu diperhatikan dalam penggunaan agregat berat dibanding agregat normal, perilaku yang terjadi pada saat proses pencampuran adukan beton, yaitu adanya perbedaan berat jenis bahan beton yang besar akan menyebabkan bahan yang berat jenisnya lebih berat cenderung mengendap ke bawah dan bahan yang berat jenisnya ringan naik ke atas, sehingga kemungkinan besar adukan mengalami pemisahan butiran (*segregasi*) dan gradasi berubah (*degradasi*) sehingga menyebabkan beton menjadi keropos. Hal ini dapat diatasi dengan cara antara lain: kontrol bahan, pengerjaan beton dengan hati-hati, penggunaan bahan tambah (*admixture*) dan menggunakan metode khusus seperti metode praletak (*Preplaced Methode*) (Popovics, 1979).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kemampuan beton berat dengan komposisi : agregat barit, pasir besi dan bahan tambah *viscocrete-10* produk PT. Sika yang dibuat dengan metode praletak, serta faktor air semen 0,5, dalam memerisai radiasi sinar gamma bila dibandingkan dengan beton normal.

METODE

Secara skematis tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Tahap dan Prosedur Penelitian

Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji dengan metode praletak :

- Benda uji berupa silinder beton dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm.
- Matrik berbentuk kubus beton dengan ukuran alas 150x150 mm² dan ketebalan berbeda-beda mulai dari 10 mm sampai 120 mm.

Pelaksanaan pencampuran adukan beton berdasarkan Satiyarno, 2000, yaitu dengan metode praletak dilakukan dengan cara meletakkan susunan agregat kasar terlebih dahulu pada cetakan, kemudian rongga pada cetakan yang berkisar 30 % dari volume, diisi (*grouting*) dengan pasta semen. Adapun campuran pasta semen terdiri dari: pasir, air serta bahan tambah *viscocrete*. Untuk mendapatkan ikatan antar agregat kasar dengan pasta yang baik maka diperlukan gradasi seragam atau gradasi timpang (*gap graded*).

Langkah-langkahnya sebagai berikut :

- Pengadukan pasta/mortar dengan menggunakan *mixconcrete* kapasitas 50 liter.
- Pencetakan benda uji terlebih dahulu menyiapkan bekisting kubus yang kedap air dan cetakan silinder beton diameter 15 cm dan tinggi 30 cm yang sudah diberi pelumas kemudian meletakkan agregat kasar batu barit sampai penuh pada cetakan silinder dan bekisting, dengan meletakkan pipa diameter 1,5 cm ditengah/diantara bekisting untuk memasukkan (*grouting/injeksi*) mortar, selanjutnya memasukkan mortar melalui pipa yang sudah disiapkan sampai penuh dan dibiarkan mengeras selama 24 jam. Sampel hasil cetakan terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Benda uji silinder beton dan matrik kubus.

Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton dilakukan dengan alat uji *Compression testing machine* (CTM) dengan benda uji beton silinder. Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada beton umur 28 hari, berdasarkan SNI- M-14-1989-F, adapun hasil yang perlu dicatat adalah pertambahan beban dan regangan hingga beban ultimit atau dengan ditandai retak pada benda uji, data ini yang selanjutnya digunakan untuk

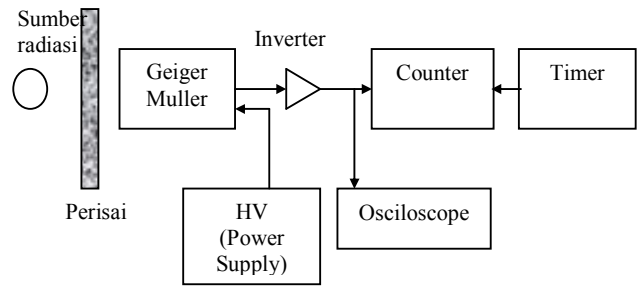
menghitung kuat tekan beton dan modulus elastisitas beton.

Pengujian Radiasi Gamma

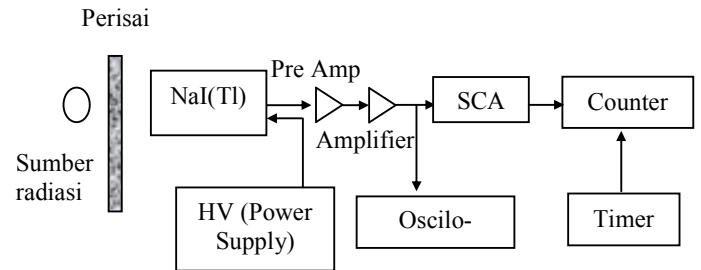
Pengujian beton terhadap sinar radiasi (*high density concrete for atomic radiation test*) yaitu untuk mengetahui kemampuan beton dalam mereduksi sumber radiasi yang ditimbulkan oleh partikel-partikel radioaktif. Adapun langkah-langkah pengujian sebagai berikut :

- Rangkaian *Spectroscopy Radiasi Gamma NaI(Tl)* yang akan digunakan untuk pengujian jenis sinar ^{152}Eu dan rangkaian *Geiger Counting* untuk mendeteksi sinar ^{137}Cs dan ^{131}I diset-up dan siap digunakan untuk pencacahan.
- Meletakkan sumber radiasi yang akan digunakan dengan memberi lapisan pelindung sumber biasanya digunakan perisai plat timbal.
- Detektor Geiger Muller diletakkan pada jarak x dari sumber radiasi.
- Dilakukan pencacahan intensitas radiasi tanpa perisai yaitu dengan cara menempelkan detektor pada sumber radiasi, hal ini dimaksudkan untuk mengetahui intensitas alami (*background counting*) di lingkungan tersebut.
- Kemudian dilakukan pencacahan perisai, dengan cara benda uji ditempatkan rapat diantara detektor dan sumber radiasi.
- Peralatan pengambilan data dipersiapkan dan waktu tiap pencacahan ditentukan selama 20 detik sebanyak 100 kali.
- Kolimator sumber radiasi dibuka dan mencatat cacah intensitas radiasi setelah melewati benda uji sebagai perisai yang dideteksi oleh detektor dan inverter serta nilainya ditampilkan oleh counter, dilakukan berulang-ulang hingga 100 kali pencacahan pada tempat yang sama.
- Pencacahan dilakukan dari benda uji dengan ketebalan 1 cm hingga ketebalan 12 cm atau sampai intensitasnya mendekati intensitas cacah latar.
- Pencacahan juga dilakukan untuk benda uji yang sama dengan sumber radiasi lain.

Skema pengujian radiasi dengan alat *Spectroscopy Radiasi Gamma NaI(Tl)* dan *Geiger Counting* dapat dilihat pada Gambar 3 dan 4.



Gambar 3. Skema Rangkaian Geiger Counting/ Geiger Muller

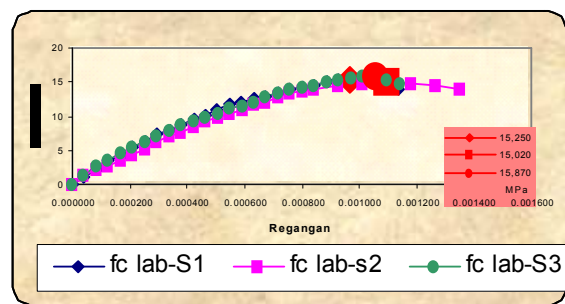


Gambar 4. Skema Rangkaian Spectroscopy Radiasi Gamma – NaI(Tl).

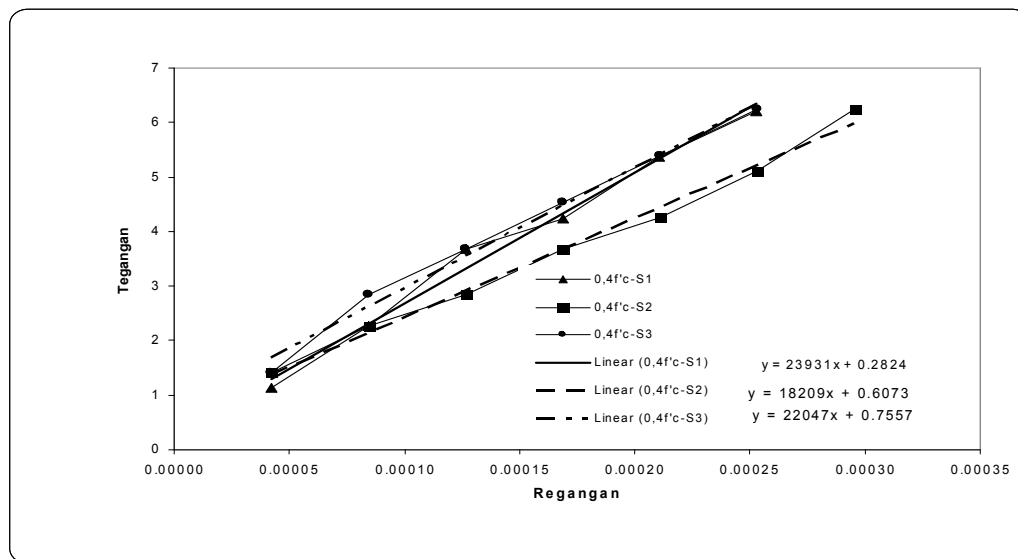
HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji kuat tekan beton dengan menggunakan alat uji CTM (*compression testing machine*) diperoleh data beban dan regangan, nilai tegangan dan regangan untuk semua benda uji diplotkan pada grafik seperti pada Gambar 5. Diperoleh kuat tekan beton silinder 1, silinder 2 dan silinder 3 masing-masing : 15,250 MPa, 15,020 MPa, 15,870 MPa. Kuat tekan rata-rata 15,38 MPa.

Beton tersebut terkategori beton normal yaitu beton yang mempunyai kekuatan antara 15 MPa hingga 30 MPa. Kekuatan beton yang diperoleh sangat rendah hal ini dipengaruhi oleh faktor kekerasan batu barit sebagai agregat kasar, agregat ini bersifat getas mudah hancur, terlihat dari uji kekerasan agregat dengan mesin Rudeloff nilainya 46,16. Hal ini membuktikan bahwa bagian agregat yang hancur sangat banyak.



Gambar 5. Grafik Kuat Tekan Beton.



Gambar 6. Grafik Modulus Elastisitas beton

Dan ditinjau dari segi struktur bangunan dalam penelitian ini, beton direncanakan untuk bangunan non struktural terutama untuk bangunan dinding radiologi rumah sakit, dimana dinding tidak menahan beban langsung, sehingga dengan kuat tekan beton yang diperoleh dari penelitian sangat aman untuk perencanaan dinding.

Bila dikomparasikan dengan kuat tekan jenis beton yang lain hasilnya seperti pada Tabel 1

Tabel 1. Kuat tekan bermacam-macam jenis beton.

Jenis Beton	Metode Adukan	Peneliti	BJ (gr/cm ³)	Kuat Tekan (MPa)
Beton berat batu barit - pasir biasa	konvensional	Dwiatmoko (1998)	2,840	17,718
Beton berat barit, silicafume & superplastr	konvensional	Dwiatmoko (1998)	2,912	33,349
Beton berat psr. barit, barit, silica fume	konvensional	Ariyuni, dkk (1999)	3,074	39,800
Beton berat psr. besi, pot. baja, visc.10	Praletak	Alhadi (2006)	5,786	24,976
Beton normal (fas 0,5)	konvensional	Anis R (2006)	2,329	46,184
Beton Normal, poilmer Sica Top 77D 10 %	konvensional	Nurokhman (2001)	2,154	24,36
Beton Normal batu slag & polimer Sica Top 77D 10 %	Konvensional	Endah Safitri (2001)	2,810	21,249

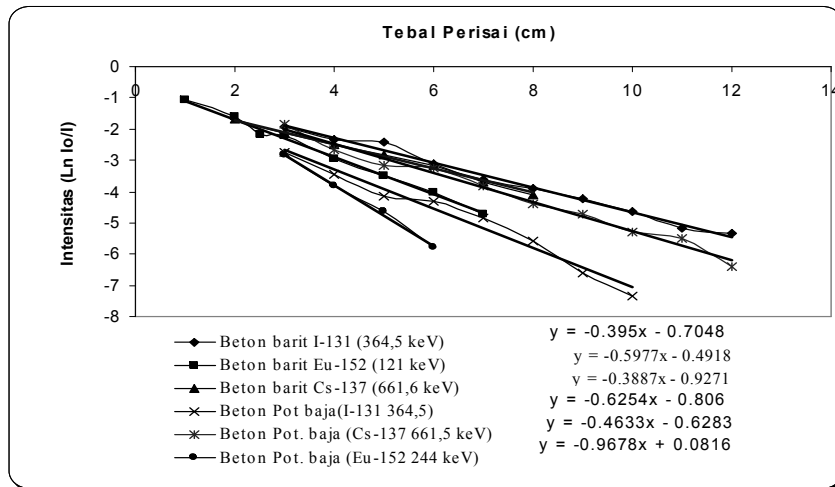
Pengujian modulus elastisitas beton didasarkan pada ketentuan (SNI-Pd M-20-1995-03), diperoleh grafik yaitu dengan cara menarik garis regresi linier

dari 40 % data tegangan regangan dari kuat tekan ($f'c$) atau beban maximum. Nilai modulus elastisitas rata-rata diperoleh 21,396 MPa. Grafik pengujian dapat dilihat seperti Gambar 6.

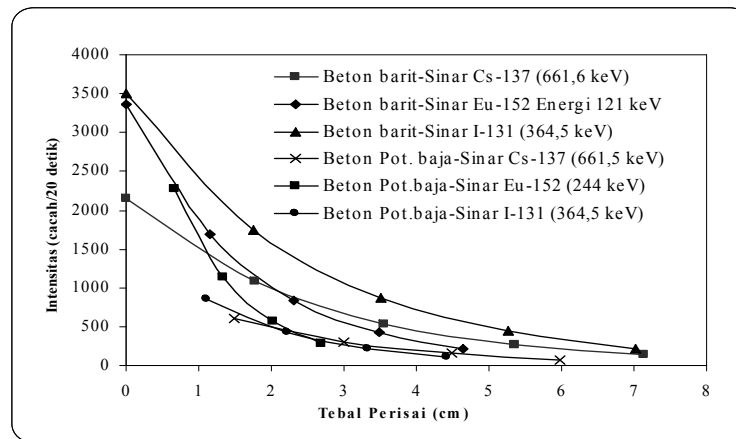
Dilihat dari berat jenis bahan, beton batu barit mempunyai berat jenis tinggi dibanding dengan agregat normal tetapi kuat tekannya lebih kecil, hal itu karena sifat barit sangat getas. Sifat lain agregat barit adalah mempunyai kemampuan tinggi sebagai perisai radiasi gamma, mengandung unsur kimia Barium (Ba) yang menurut tabel periodik mempunyai nomor massa tinggi yaitu 56, semakin tinggi nomor atom bahan maka semakin baik bahan tersebut menyerap radiasi gamma dan semakin tinggi kerapatan beton juga semakin tinggi kemampuan menyerap radiasi gamma.

Adapun cara yang digunakan untuk meningkatkan densitas beton, yaitu dengan metode praletak, dengan menggunakan metode ini barit yang getas tidak hancur saat proses pengadukan, karena dalam pengadukan beton, agregat kasar (barit) dipisahkan dari pasta semen/mortar, metode ini akan meningkatkan densitas beton bila dibandingkan dengan cara konvensional. Dengan cara konvensional barit dimungkinkan akan hancur saat pengadukan sehingga fungsi barit sebagai agregat kasar akan berubah menjadi agregat halus dan komposisi bahan penyusun adukan beton berubah fungsi menjadi bahan penyusun adukan mortar, dimana adukan mortar mempunyai densitas yang lebih rendah dibanding beton.

Data hasil pengujian intensitas radiasi dan ketebalan perisai diplotkan dalam grafik seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Hubungan Tebal perisai dengan Intensitas dalam Skala Semilog.



Gambar 8. Grafik HVT dengan Ketebalan Perisai

Dari grafik didapat koefisien attenuasi beton barit-pasir besi untuk sumber radiasi Europium-152, Iodium-131, dan Cesium-137 berturut-turut sebagai berikut: $0,5977 \text{ cm}^{-1}$, $0,3950 \text{ cm}^{-1}$, $0,3887 \text{ cm}^{-1}$.

Nilai tebal paro atau *half value thickness* (HVT) yang didefinisikan sebagai tebal bahan perisai yang diperlukan untuk mengurangi intensitas radiasi menjadi setengah dari intensitas sebelum dilemahkan oleh perisai. (1 HVT, 2 HVT, 3 HVT dan 4 HVT), dihitung dengan persamaan $HVT = 0,693/\mu$, seperti pada Gambar 8.

Proses pelemahan radiasi baik sinar-X maupun sinar γ dalam suatu bahan perisai bersifat eksponensial sesuai persamaan berikut :

$$I = I_0 e^{-\mu x} \dots\dots\dots [1]$$

dimana :

- I = intensitas radiasi setelah melalui perisai radiasi (cacah/dt)
- I_0 = intensitas radiasi sebelum melalui perisai radiasi (cacah/dt)

- μ = koefisien serapan linier (*attenuasi*) bahan perisai (cm^{-1})
- x = tebal bahan perisai (cm)

Dari besarnya koefisien attenuasi berbagai bahan perisai yang didapat terlihat bahwa bahan Timbal yang paling efektif menahan radiasi, sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar densitas bahan perisai, maka semakin besar pula koefisien attenuasi bahan tersebut dan semakin besar nilai koefisien attenuasi, dengan mensubstitusikan ke Persamaan [1] diperoleh ketebalan beton yang semakin tipis. Juga semakin tinggi energi radiasi yang dipancarkan pada suatu bahan perisai maka koefisien attenuasi yang diperoleh akan semakin kecil.

Adapun data energi masing-masing sumber radiasi dan koefisien attenuasi (μ) untuk beton agregat barit-pasir besi dan beton potongan baja, beton barit-pasir barit serta perisai jenis lainnya oleh peneliti terdahulu disajikan pada Tabel 2 dan diperjelas pada grafik seperti pada Gambar 9.

Tabel 2. Nilai Koefisien Attenuasi (μ) untuk bermacam-macam beton & energi radiasi.

Jenis Bahan Perisai	Peneliti	Bj (gr/cm ³)	Sumber radiasi	Energi (keV)	Koef. attenuasi linier (cm ⁻¹)	Koef. attenuasi massa (cm ² /gr)	
Beton Normal	Akhadi (2000)	2,35	-	200	0,291	0,12382	
				500	0,204	0,08680	
				800	0,166	0,07063	
Beton berat pasir barit- barit & viscocrete-10 15 cc/m ³ (fas 0,5)	Rusnaldi (2006)	3, 241	¹⁵² Eu	121,78	0,508	0,13390	
				244,69	0,489	0,15859	
				¹³¹ I	364,5	0,514	0,15087
Beton berat pasir besi – pot. baja & viscocrete-10 cc/m ³ (fas 0,5)	Alhadi (2006)	5,786	¹⁵² Eu	244,69	0,9678	0,08032	
				¹³¹ I	364,5	0,6254	0,10842
				¹³⁷ Cs	661,6	0,4633	0,16778
Besi	Akhadi (2000)	7,42	-	200	0,090	0,13797	
				500	0,655	,082910	
				800	0,525	0,06645	
Timbal	Akhadi (2000)	11,3	-	500	1,640	0,14513	
				800	0,945	0,08362	
				1500	0,579	0,05123	

Ket: tanda – menunjukkan data tidak diperoleh dari sumber pustaka.

Dari grafik regresi diatas ditunjukkan nilai koefisien attenuasi untuk beton barit-pasir besi mengikuti persamaan $y = 0,6053e^{-0,0008x}$ berlaku untuk energi berkisar antara 121,7824 keV hingga 661,6 keV.

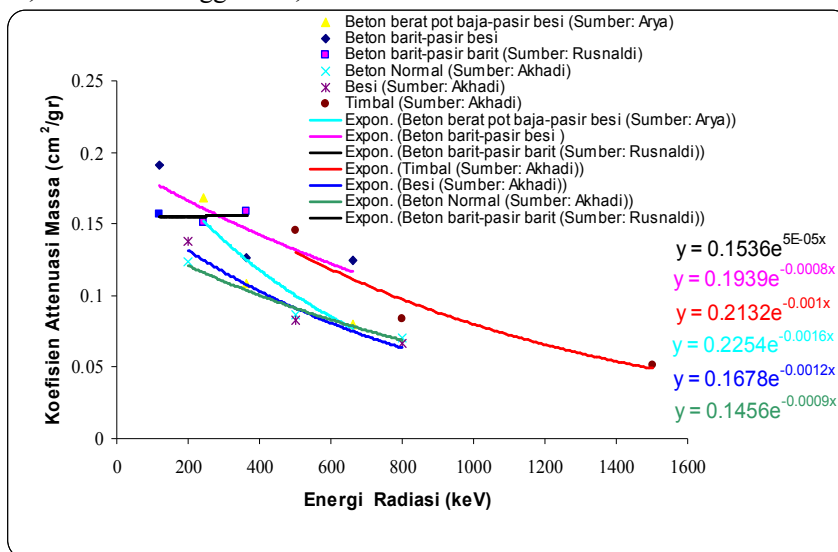
Nilai koefisien attenuasi secara nominal berkisar antara 0,3887cm⁻¹ hingga 0,5977 cm⁻¹. Menurut Pranyoto, M.R, Marsongkohadi 1978, koefisien attenuasi untuk beton barit berat jenis 3,5 dan energi radiasi 1000 keV yaitu 0,2130 cm⁻¹. Hal ini membuktikan bahwa hasil penelitian didapat nilai koefisien attenuasi yang tidak jauh berbeda dari Pustaka. Dari besaran koefisien attenuasi massa berbagai bahan perisai yang didapat, terlihat bahwa bahan beton berat pasir besi dan barit kemampuan menahan radiasi gamma hampir mendekati bahan timbal.

SIMPULAN

Berdasarkan data-data yang diperoleh dari eksperimen dan pengamatan serta analisis data, dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain:

Dari pengujian kualitas beton dengan agregat barit - pasir besi, didapat nilai: berat jenis, kuat tekan, modulus elastisitas, yaitu 3121 kg/m³, 15,38 MPa dan 21,396 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa beton barit mempunyai berat jenis tinggi sehingga terkategori beton berat. Berdasarkan uji kuat tekan, beton mampu menahan struktur sehingga dalam perencanaan ini sangat aman karena tujuan awal perencanaan terutama untuk desain dinding yang merupakan bagian non struktur dalam bangunan.

Dengan menggunakan metode praletak dapat meningkatkan densitas beton barit, karena sifat agregatnya yang getas sehingga mengurangi keretakan barit pada saat adukan beton, dimana semakin tinggi densitas beton daya serap radiasinya lebih tinggi bila dibandingkan dengan beton konvensional.



Gambar 9. Grafik Hubungan antara Energi Radiasi dengan Koefisien Attenuasi massa (μ).

Penambahan bahan tambah viscocrete-10 membuat adukan mortar menjadi encer, sehingga memudahkan dalam proses grouting kedalam beton dan membuat beton tidak keropos (*porous*).

Koefisien *attenuasi* (μ) yang didapat dengan sumber radiasi: Europium-152 energi 121,782 keV, Iodium-131 dan Cesium-137 sebesar $0,5977 \text{ cm}^{-1}$, $0,395 \text{ cm}^{-1}$, $0,3887 \text{ cm}^{-1}$ dan membentuk persamaan $y = 0,6053e^{-0,0008x}$ berlaku untuk energi antara 121,782 keV hingga 661,6 keV.

Semakin besar densitas bahan perisai yang digunakan, maka semakin besar koefisien *attenuasi* bahan tersebut, sehingga semakin besar nilai koefisien *attenuasi* diperoleh ketebalan beton yang semakin efisien.

REKOMENDASI

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan ada beberapa saran yang harus disampaikan diantaranya terkait dengan ketebalan sampel perisai yang tebal maka perlu diadakan penelitian dengan menggunakan sumber radiasi yang memiliki aktivitas dan energi radiasi yang lebih tinggi, hal ini dimaksudkan agar didapatkan koefisien regresi antara ketebalan dengan intensitas radiasi maupun antara variasi ketebalan sebagai fungsi energi tanpa harus ekstrapolasi data.

Penurunan intensitas radiasi elektromagnetik dengan persamaan $I = I_0 e^{-\mu x}$ hanya berlaku ketika perisai radiasi relatif tipis, dimana berkas radiasi hampir seluruhnya diasumsikan lolos dan hanya sebagian kecil foton yang dihamburkan oleh perisai tersebut. Pada radiasi elektromagnetik dengan perisai yang relatif tebal, sejumlah besar foton dapat dihamburkan oleh perisai dan kembali ke berkas utama sebelum akhirnya mengenai detektor, foton hambur tadi juga mungkin akan berinteraksi lagi dengan perisai dan dihamburkan lagi begitu seterusnya yang dikenal dengan istilah *build up factor*. Maka dalam penggunaan perisai yang tebal perlu diperhitungkan faktor *build up* (B), yang biasanya digunakan persamaan $I = I_0 \cdot B \cdot (\mu x) \cdot e^{-\mu x}$ dengan B (μx) adalah *build up factor*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Peneliti menyampaikan rasa terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Jurusan Teknik Struktur Pasca Sarjana UGM, Laboratorium Bahan Teknik Sipil UGM, Laboratorium Analisis Radioaktivitas Teknik Fisika UGM, serta Rumah Sakit Sardjito yang telah memberikan sarana dan prasarana, fasilitas serta kerjasamanya sehingga penelitian ini dapat terselesaikan.

REFERENSI

- Akhadi, N., 2000, "Dasar-dasar Proteksi Radiasi", Rineka Cipta, Jakarta.
- Alhadi, A., 2006, Penggunaan Beton Berat Slot Steel sebagai Perisai Radiasi Sinar Gama, Tesis, Jurusan Struktur Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.
- Anis, R., 2006, "Pengaruh Fakur Air Semen pada Beton Normal sebagai Perisai Radiasi Sinar Gama", Tesis, Jurusan Struktur Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.
- Anonim, 2003, "Metode, Tata cara dan Spesifikasi (SNI-M-14-1989-F)", Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah Badan Penelitian dan Pengembangan, Jakarta.
- Anonim, 2003, "Metode, Tata cara dan Spesifikasi (SNI-Pd M-20-1995-03)", Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah Badan Penelitian dan Pengembangan, Jakarta.
- Ariyuni Essy, Tjahjono Elly, Kadarisman Bisanto, dan Suyati, 1999, "Rancang Campuran Beton Kerapatan Tinggi dengan Menggunakan Agregat Kasar Barit sebagai Penahan Radiasi", *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah P3TM-BATAN, 14-15 Juli 1999*, Yogyakarta.
- Dwiatmoko, Y., 1998, "Studi Beton Berat dengan Agregat Batu Barit untuk Perisai Radiasi Neutron", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil FT UGM, Yogyakarta.
- Nurokhman, 2001, "Daya Serap Radiasi Gamma dan Neutron Cepat dan Sifat Mekanis Beton Polimer dengan Agregat Normal", Tesis, Jurusan Struktur Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.
- Popovic. S., 1979, "Concrete Making Material", Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- Raju, Krishna. N., 1983, "Design of Concrete Mixes", CBS Publishers, India.
- Rusnaldi, 2006, "Penggunaan Beton Berat dengan Agregat Barit sebagai Perisai Radiasi Sinar Gama", Tesis, Jurusan Struktur Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.
- Safitri, E., 2001, "Beton Sebagai Perisai Radiasi Neutron Cepat", *Jurnal Media Teknik Sipil*, Edisi Januari 2006, Surakarta.
- Satyarno I., 2000, "Laporan Bulanan Perencanaan dan Supervisi Pelaksanaan Hydro Power System", Pemerintahan Propinsi DIY (DISKRIMPRASWIL), Yogyakarta.
- Stephenson, R., 1954, "Introduction To Nuclear Engineering", McGraw Hill Book Company Inc., New York.

